Série E;
N° d'ordre:
7

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Joseph LACOSTE

Professeur au Collège de Mende

1re THÈSE. — Contribution a la Prévision du Temps par les sondages aérologiques et les parasites atmosphériques.

2e THÈSE. — Proposition donnée par la Faculté.

Soutenues le 29 MAI 1923 devant la Commission d'examen

MM. ROTHÉ..... *Président*
HACKSPILL... } *Examinateurs*
LABROUSTE... } *Examinateurs*
REMPP ..... } *Examinateurs*

MENDE
IMPRIMERIE TYPOGRAPHIQUE G. PAUC
6, Rue d'Ayguespasses, 6

1923

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548024_0005

SÉRIE E;
N° D'ORDRE:
7

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Joseph LACOSTE

Professeur au Collège de Mende

1re THÈSE. — CONTRIBUTION A LA PRÉVISION DU TEMPS PAR LES SONDAGES AÉROLOGIQUES ET LES PARASITES ATMOSPHÉRIQUES.

2e THÈSE. — PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 29 MAI 1923 devant la Commission d'examen

MM. ROTHÉ..... *Président*
HACKSPILL...
LABROUSTE... } *Examinateurs*
REMPP.....

MENDE
IMPRIMERIE TYPOGRAPHIQUE G. PAUC
6, Rue d'Ayguespasses, 6

1923

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Doyen.....	P. MULLER.....	Professeur de Chimie générale et de Chimie physique.
Doyen hon..	E. BATAILLON...	
Professeurs.	A. DENJOY.....	Mathématiques générales.
	G. VALIRON.....	Calcul différentiel et intégral.
	H. VILLAT.....	Mécanique.
	M. FRÉCHET.....	Analyse supérieure.
	E. ESCLANGON...	Astronomie.
	P. WEISS.....	Physique générale.
	H. OLLIVIER.....	Physique générale.
	E. ROTHÉ.....	Physique du Globe.
	L. HACKSPILL....	Chimie minérale.
	H. GAULT.....	Chimie organique.
	E. TOPSENT.....	Zoologie et Anatomie comparée.
	C. HOUARD.....	Botanique.
	E. TERROINE.....	Physiologie générale.
	J. DE LAPPARENT	Pétrographie.
	M. GIGNOUX.....	Géologie et Paléontologie.
	E. CHATTON.....	Biologie générale.
	E. BAUER.....	Physique mathématique.
	E. CORNEC.....	Chimie appliquée.
	H. LABROUSTE..	Physique du Globe.
	G. RIBAUD.....	Physique générale.
	F. VLÈS.....	Physique biologique.
Secrétaire..	A. RENARD.....	

A Monsieur ROTHÉ

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DIRECTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE STRASBOURG

A ma Femme

A nos Parents

A nos Amis

CONTRIBUTION

à la prévision du temps

par les sondages aérologiques et par les parasites atmosphériques

INTRODUCTION

Les sondages atmosphériques apportent une contribution importante à la prévision du temps. Au cours de la guerre j'ai été appelé à exécuter, pendant plus de deux ans, un grand nombre de ces sondages, de nuit et de jour.

Chercher certaines relations entre les formes des graphiques représentant la projection horizontale de la marche du ballon, les données des cartes synoptiques du temps et l'allure du baromètre, telle a été l'idée fondamentale de ce travail dont j'ai déduit quelques conclusions qui peuvent contribuer à la **prévision météorologique**.

J'ai été encouragé dans cette voie par l'impérieuse nécessité de bonnes prévisions. En effet, aux besoins territoriaux et maritimes se sont ajoutées, pendant la guerre, les demandes de l'aviation, de l'aérostation, du service routier, du service de renseignements, et à ces services ne pouvaient suffire des probabilités au sol. Même aujourd'hui, l'étude des courants aériens prend une importance particulière en raison de la navigation aérienne. Plus que jamais il est nécessaire de fournir aux compagnies de navigation les renseignements indispensables à la préparation de leurs voyages aériens dans les meilleures conditions de sécurité pour les passagers.

Je me propose de rappeler d'abord l'historique de la méthode des ballons-sondes et des ballons-pilotes utilisés dans les sondages

aérologiques. J'indiquerai ensuite ma contribution personnelle aux études sur la prévision du temps.

Au siècle passé, l'organisation d'observations régulières au sol a absorbé la plus grande partie des météorologistes. Ces observations, publiées en France depuis 1849, ont servi de base, par les importantes données qu'elles ont fournies à ce qu'on peut appeler **la météorologie statique**. Parallèlement s'est développée **la météorologie dynamique** qui étudie les variations simultanées des divers éléments météorologiques. La science a été lancée dans cette voie nouvelle par Le Verrier. Il a été le premier en Europe à concevoir l'existence de la **météorologie télégraphique** et à montrer par des faits concluants la possibilité de la prévision du temps. Nous lui devons l'organisation de notre service météorologique international des avertissements rendus possibles par l'étude, au sol, des mouvements généraux de l'atmosphère, grâce surtout aux cartes synoptiques du temps établies depuis 1856.

La méthode imaginée par Le Verrier a réalisé depuis peu, par la télégraphie sans fil, d'importants progrès. Aujourd'hui les observations européennes, faites à une heure donnée, sont rapidement concentrées de sorte qu'il en résulte une connaissance accélérée de l'état journalier de l'atmosphère. Mais la télégraphie sans fil ne doit pas se borner à l'envoi de radiogrammes annonçant l'état de l'atmosphère et les probabilités pour le lendemain. Les renseignements les plus utiles pour la prévision sont les données instantanées ; celles qui viennent des stations situées à l'ouest ont une importance spéciale. Or la France est mal partagée sous ce rapport, comme toute l'Europe occidentale. Les seules stations avancées sont les Açores, l'Islande et Valentia en Irlande ; il existe cependant un grand nombre de stations mobiles qui sillonnent l'Atlantique ; ce sont les navires marchands et les paquebots qui peuvent fournir des observations recueillies à l'ouest de nos côtes, observations précieuses entre toutes pour les météorologistes chargés de la prévision. Il est donc essentiel, pour la sécurité des navigateurs aériens que ces télégrammes météorologiques recueillis en mer puissent être transmis par T. S. F., par priorité, aux offices météorologiques.

Des ondes électriques sont créées naturellement dans l'atmosphère, ce sont les ondes que les télégraphistes appellent **parasites**. *J'indiquerai encore la contribution personnelle que j'ai apportée à la prévision par l'étude des parasites atmosphériques.*

Depuis 1892 la météorologie est entrée dans une voie nouvelle ; par d'ingénieux moyens elle a pu procéder à de nombreuses investigations en altitude. Si d'autres centres scientifiques peuvent revendiquer dans cette exploration l'emploi du cerf-volant, la France a réalisé par le ballon des conquêtes indiscutables.

Jusqu'en 1892 les observations météorologiques à grande hauteur ont été exécutées au moyen d'aérostats par des physiciens qui emportaient avec eux les appareils nécessaires dont ils notaient eux-mêmes les indications (1). Ces ascensions aux hautes altitudes n'étaient pas sans péril, témoin la dramatique ascension du *Zénith*. Les progrès réalisés dans la construction d'appareils enregistreurs automatiques permirent d'utiliser des aérostats non montés emportant les instruments appropriés.

Telle est l'idée première des ballons-sondes.

(1) Gaston Tissandier, *Histoire des ballons*. Chap. VII. L'exploration de l'air.

CHAPITRE PREMIER

Ballons-sondes

Le ballon-sonde est une invention française. En 1892 le Commandant Renard présentait à la Société française de physique une étude très complète *sur l'emploi des ballons perdus pour l'exécution des mesures météorologiques à très grandes hauteurs* (1). Mais les projets du Commandant Renard avaient déjà été mis en exécution dès le mois de mars 1892 par MM. Hermite et Besançon avec un ballon de 26 m³. Ces mêmes aéronautes lancèrent, au-dessus de Paris, les 14, 17, 20 novembre 1892 des ballons-sondes emportant des thermomètres à minima (2). Ils abandonnèrent bientôt l'emploi du papier verni japonais et l'Aréophile n° 1, cubant 113 m³, fut construit en baudruche. Ce ballon s'éleva le 21 mars 1893, de l'usine de Vaugirard, muni des enregistreurs Richard ; il atteignit 15.000 m. de hauteur et tomba près de Joigny (Yonne) après avoir rencontré une température de —51° (3).

Cette méthode d'étude de la haute atmosphère, ainsi pratiquée en France, fut immédiatement adoptée à l'étranger. Le 11 mars 1894, R. Assmann lance le premier ballon allemand (4).

MM. Hermite et Besançon continuent leurs lancers ; ils enregistrent une température de —60° à 14.000 m. d'altitude en employant

(1) Voir : *Journal de physique*, février 1893.

(2) Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, CXV page 862.

De Fonvielle. — *Les Ballons-sondes*, Paris, Gauthier-Villars.

Meteorolog. Zeitschrift, 1893, page 229.

Revue Scientifique, 22 avril 1899. Les *Ballons-sondes*, par A Bouquet de la Grye.

(3) Ce même ballon fut brûlé par des enfants à son atterrissage dans la Forêt-Noire.

(4) De Fonvielle, *Les ballons-sondes*, page 38.

le parasoleil pour abriter les instruments contre la radiation solaire. Ces premiers essais permettent déjà une comparaison entre les états atmosphériques en divers lieux.

Dès le début de 1896, MM. Hermite et Besançon se préoccupent de prélever de l'air au sommet de la trajectoire du ballon-sonde, et l'Aérophile lancé le 22 mars emportait un appareil à prise d'air automatique, auquel M. Cailletet apporta plus tard d'importants perfectionnements.

Sous l'impulsion de la Commission internationale de météorologie, instituée par la Conférence de Paris, en septembre 1896, sous la présidence de M. Mascart, des ascensions à grande hauteur sont faites d'une manière méthodique et simultanée dans différents pays. La première est de la nuit du 13 au 14 novembre 1896 (1). Un 2e essai fut réalisé le 18 février 1897 (2). Ces observations simultanées montrent qu'à grande hauteur l'atmosphère obéit à des lois générales, mais dans les couches inférieures on trouve des pertubations causées par l'orographie du pays et la nature du sol.

En 1901, R. Assmann, Directeur de l'Observatoire aéoronautique de Berlin, propose l'emploi du caoutchouc comme enveloppe du ballon-sonde. Le 1er essai est du 14 février 1901, à Berlin (3). A la conférence internationale aéronautique tenue à Berlin en 1902, R. Assmann fait un rapport sur l'emploi du ballon-sonde en caoutchouc ; il montre que la réduction du volume du ballon est possible, que la ventilation du thermomètre est meilleure, qu'on peut obtenir une plus grande sûreté dans les inscriptions, et enfin atteindre de plus grandes hauteurs.

Le 1er sonde en caoutchouc à Strasbourg est du 3 juillet 1902, et bientôt l'emploi du caoutchouc se généralisa en Allemagne, en France, en Angleterre, en Italie et dans tous les observatoires. Les résultats obtenus par les lancers de ballons-sondes sont importants, grâce aux ascensions méthodiquement réglées. Ces ascensions

(1) Des détails sur ce 1er lancer sont donnés dans la *Revue Scientifique* du 17 avril 1897.

(2) Voir Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences du 8 mars 1897. Communications de MM. Hermite et Besançon sur le 2me lancer et de MM. Müntz et Cailletet sur l'analyse de l'air prélevé à 15.500 m.

(3) Ergebnisse der Arbeiten am Aeronautischen Observatorium in den Jahren 1900 und 1901, von R. Assmann.

atteignent et dépassent souvent la zone de 10.000 à 12.000 mètres. Un ballon lancé à Trappes en août 1907 parvient à 28.000 m. ; un autre lancer à Uccle (Bruxelles) en novembre 1908 atteint 29.000 m. Enfin, le ballon du professeur Gamba, lancé à Pavie le 17 décembre 1912, s'élève jusqu'à 37.700 m. Le retour à terre des instruments inscripteurs se fait par parachute. On a également imaginé un autre dispositif qui semble se généraliser dans les principaux observatoires aérologiques. On utilise deux ballons en tandem ; l'un d'eux, de force ascensionnelle beaucoup moindre que l'autre et insuffisante pour lui permettre de porter seul les instruments, les ramène au sol lorsque le ballon principal a éclaté. Le 1er tandem à Strasbourg est du 7 août 1902.

Le ballon-sonde une fois parti va où l'entraîne le vent, il n'obéit à aucune volonté humaine, nul ne sait jamais d'avance où il atterrira ; il faut enfin un temps matériel pour que les appareils, quand ils sont retrouvés, retournent à l'observatoire. On conçoit donc aisément que les données d'un pareil sondage deviennent inutiles pour la prévision du temps tout en présentant une utilité au point de vue de la *physique atmosphérique*.

I. — Des visées des ballons-sondes. — Les premiers sondages avaient eu pour but unique l'étude de la décroissance de la pression (1) et celle de la température avec la hauteur, mais, de bonne heure, on eut l'idée de viser les aérostats pour déterminer leur trajectoire et se faire ainsi une idée des courants atmosphériques.

Dès 1873 des ballons montés sont visés au théodolite en Allemagne. Le 19 juillet 1885, M. P. Schreiber, à Chemnitz, vise un ballon avec deux théodolites et propose de viser de la même façon des *ballons en caoutchouc*. Schreiber prévoyait déjà l'avantage de pareilles visées sur l'examen des nuages et laissait entrevoir leur utilité pour la prévision du temps (2).

D'autre part, en 1893, M. Kremser (3) propose des visées systématiques des ballons pour déterminer le mouvement de l'air en hauteur. Un théodolite donnera l'azimut et le site, un oculaire micrométrique déterminera le diamètre du ballon, d'où l'on déduira la

(1) M. de Fonvielle. Note à l'Académie des Sciences. Août 1902.

(2) Meteorologische Zeitschrift, 1886, page 341.

(3) Réunion à Berlin de la Société météorologique allemande. — Meteorologische Zeit... 1893.

distance. Kremser indique aussi que, dans le même but, de nombreux petits ballons ont été lancés d'Amiens pour déterminer les courants atmosphériques sur la France. Les directions étaient obtenues en considérant seulement le point de départ et le point de chute.

D'ailleurs dès qu'apparurent les ballons-sondes avec MM. Hermite et Besançon, ceux-ci eurent vite le souci de suivre leur mouvement. Le 21 mars 1893 ils visaient l'Aérophile avec une lunette (1). Mais en raison de l'insuccès obtenu par l'usage de la lunette astronomique micrométrique. M. Hermite résolut de viser les ballons à l'aide de deux théodolites disposés suivant une base déterminée. Toutefois la pratique de ce procédé exigeait des opérateurs très exercés (2).

Dans son ascension du 5 août 1896 l'Aérophile fut visé avec un appareil enregistreur : *le dromographe Hermite* (3). On put ainsi déterminer la vitesse des courants supérieurs et on eut l'idée que la vitesse de ces courants augmente avec l'altitude (4).

Mais déja à Trappes les visées des ballons s'effectuaient minutieusement non seulement pour obtenir leur trajectoire, mais pour contrôler la formule barométrique. — Devant la Commission internationale de Strasbourg (1898), M. Teisserenc de Bort montre que la détermination de la hauteur par le baromètre est sensiblement concordante avec la méthode de la double ou triple visée. « Malheureusement, ajoute M. Teisserenc de Bort, ces visées, par « vent un peu fort, ne peuvent se prolonger longtemps parce « qu'on perd bientôt le ballon de vue. Au contraire, la méthode « qui consiste à photographier le sol à l'aide d'un appareil auto- « matique porté par le ballon, permet de calculer la hauteur du « ballon à tout moment de sa course, pourvu que les nuages ne « soient pas continus. On peut ainsi profiter de toutes les éclair- « cies ». Cette méthode préconisée par la Commission d'aérosta-

(1) Comptes-Rendus. Académie des Sciences. CXVI. N° 15.

(2) Une visée restée célèbre est celle du 18 février 1897; pratiquée à Schœneberg, devant l'empereur, l'impératrice et les ambassadeurs de France et de Russie. Le Cirrus II a pu être suivi jusqu'au sommet de sa trajectoire. Le barographe donne 8850^{m} ; les visées accusent 8800^{m}.

(3) Le dromographe Hermite est décrit dans le journal *l'Aérophile*, n° 1, 1897.

(4) Le ballon du 5 août 1896 tomba à Niederniebach à 30 k. au-delà de Cologne, accusant une vitesse de vent de 132 k. à l'heure dans la couche 7700^{m}-8200^{m}.

tation scientifique de Paris et pour laquelle Cailletet a si heureusement imaginé son appareil a été d'abord expérimentée du haut de la tour Eiffel, puis sur un ballon monté le 21 octobre 1897 (1).

Ainsi donc dès leur apparition les ballons-sondes furent visés soit par Hermite et Besançon, soit à Trappes par Teisserenc de Bort. A la 4e conférence internationale aéronautique tenue à St-Pétersbourg (1904) M. de Quervain affirme *que c'est un crime météorologique de laisser disparaître, dans le bleu du ciel, un ballon-sonde sans déterminer sa trajectoire par des visées. Les résultats de ces visées sont au moins aussi importants que les diagrammes des enregistreurs.*

Le 1er ballon-sonde en caoutchouc visé à Strasbourg par M. de Quervain est du 2 juillet 1903, la visée est faite avec un instrument de fortune (2).

A la 5me Conférence, tenue à Milan en 1906, M. de Quervain insiste encore sur les visées des ballons-sondes et ajoute : « Je suis enfin parvenu à construire un instrument qui permet de faire ces visées avec toute l'aisance possible ». Le théodolite de Quervain avait été employé pour la 1re fois à Strasbourg le 9 février 1905 et les résultats du sondage ont été publiés par M. Hergesell (3). Cet appareil est caractérisé par deux vis micrométriques à mouvement continu permettant de maintenir facilement l'axe du théodolite dans la direction du ballon (4). Bientôt après apparurent en Allemagne le théodolite Bunge (5). et le théodolite Heyde. Nous possédons en France le même genre de théodolites avec le précieux avantage d'une installation immédiate grâce à une aiguille de déclinaison (déclinatoire) mettant un diamètre horizontal dans la direction du méridien magnétique.

II. — Teisserenc de Bort et l'étude de la haute atmosphère. — Nous avons eu l'occasion de citer Teisserenc de Bort. L'étude de la haute atmosphère lui doit beaucoup en effet. Si Hermite et Besançon eurent l'initiative des lancers des ballons-sondes, Teisse-

(1) Comptes-Rendus, Académie des Sciences. 26 octobre — 2 novembre 1897.

(2) Beitrag z. Phys. der freien Atm. Tome I, page 47.

(3) Beitrag z. Phys. *id.* Tome I, page 47.

(4) Un 1er cliché et une première description du théodolite de Quervain ont été donnés dans la meteorologische Zeitschrift, 1906, page 149.

(5) Voir : das koniglich preussische Aer. Lindenberg von R. Assmann, page 191.

renc, en dehors de beaucoup d'autres travaux météorologiques, perfectionna, à Trappes, la technique de ces lancers. C'est le 8 janvier 1899 qu'il découvrit la stratosphère. Dès le mois de juin 1899 (1) le gouvernement allemand envoya une mission à Trappes pour y étudier l'organisation et les méthodes employées avant de fonder l'*Observatorium de Prusse*.

La mort de Teisserenc de Bort, le 2 janvier 1913, fut une grande perte pour la météorologie. Voici ce que nous extrayons d'un article nécrologique de Berson (2) :

« Sa réputation était déjà excellente parmi tous les météorolo-
« gistes de tous les pays, lorsque, à l'âge de 40 ans environ, il se
« tourna avec un zèle acharné vers cette nouvelle branche de la
« physique de l'atmosphère qui devait à partir de là former
« l'essence de sa vie et de ses travaux..... Il est impossible de
« signaler même superficiellement toute l'importance de ses
« travaux ou d'en énumérer les résultats. En effet une grande
« partie de toutes nos connaissances sur la répartition des éléments
« météorologiques dans l'océan aérien et les relations qui existent
« entre eux sont dues à ses travaux. »

(1) Voir : l'Aérophile 1899. N° 8

(2) Berson. Meteorol. Zeitsch. 1913. S. 314

CHAPITRE II

De l'avion météorologique

L'aéroplane a apporté un nouveau mode d'investigation atmosphérique. Si la météorologie s'est développée pendant la guerre pour aider l'aviation, l'aéroplane à son tour devient l'auxiliaire de la météorologie.

L'emploi de l'aéroplane pour le sondage atmosphérique s'est généralisé dans les stations de groupes d'armées en 1918. Deux fois par jour, le matin et le soir, et plus souvent au besoin, un aéoroplane emportait le baro-thermo-hygro-inscripteur. On pouvait ainsi avoir rapidement la décroissance de température, les variations de pression et d'humidité avec la hauteur. Les résultats trouvés étaient transmis d'urgence aux armées alliées qui les utilisaient pour les tirs d'artillerie. — On peut entrevoir un autre avantage de l'avion météorologique. Une de ses ascensions jusqu'à 3000 mètres n'exige pas plus d'une heure. Il est donc possible d'avoir avec lui et assez rapidement les variations du gradient thermique avee l'altitude. Or la connaissance de ce gradient me paraît précieuse pour la prévision du temps, comme j'ai pu m'en rendre compte en utilisant les données de l'avion météorologique du groupe d'armées de réserve peudant l'été 1918. A cet effet j'ai divisé la basse atmosphère en couches superposées de 1000 mètres et calculé le gradient thermique pour chaque couche. Si l'on examine les résultats il est facile de voir : 1° que le gradient thermique est plus fort au sein d'une dépression que sur un anticyclone.

2° Si le gradient thermique croît avec l'altitude le baromètre baisse rapidement.

3° Si le gradient thermique varie peu avec l'altitude le baromètre reste sensiblement stationnaire.

4° Si le gradient thermique décroît avec l'altitude le baromètre se met en hausse.

Ainsi une ascension du matin peut nous laisser prévoir l'allure du baromètre et contribuer grandement à la prévision du temps.

A titre d'exemples je citerai les faits suivants :

	Couches atmosphériques.	Gradient moyen.	
13 juin 1918	0-1000m	0,3	le baromètre doit baisser.
	1000-2000	0,04	Baromètre le 13 : 768 766,9 766,6.
	2000-3000	0,44	— le 14 : 765.9 764,2 761,6.
17 juin 1918	0-1000	0,3	Une dépression restera stationnaire.
	1000-2000	0,8	Baromètre le 17 : 756,4 757 757,9.
	2000-3000	0,7	— le 18 : 760,8 759,7 768,5.
	3000-4000	0,7	— le 19 : 755,2 756,5 757,2.
23 juin 1918	0-1000	0.5	Le baromètre sera stationnaire.
	—2000	0,4	Baromètre le 23 : 766,4 767,3 767,6.
	—3000	0,45	
	—4000	0,55	
24 juin 1918	0-1000	0,05	Le baromètre va baisser rapidement.
	—2000	0,5	Baro. le 24 : 767.4 765,4 762,5.
	—3000	0,55	
	—4000	0,65	
25 juin 1918	0-1000	0,15	Le baromètre remontera sous peu.
	1000-2000	0,8	Baro. le 25 : 763,8 762,1 760,6.
	3000	0,2	— le 26 : 763,6 763,6 763,5.
26 juin 1918	0-1000	0,75	Le baro sera stationnaire.
	—2000	0,45	Baro. le 26 : ci-dessus.
	—3000	0,60	— le 27 : 764.2 763,4 763,7.
16 juillet 18	—	0,2	Baromètre en baisse.
	—	0,65	Baro. le 16 : 758,7 757,6 757,5.
	—	0,85	

17 juillet 18	—	0,15	Nouvelle chute du baromètre (**orage**).
		0,45	Baro. le 17 : 758,7 756,3 754.
	—	0,70	
20 juillet 18	—	0,05	Chute du baromètre (**orage**).
	—	0,65	Baro. le 20 : 760,2 752,7 755,5.
	—	1	
21 juillet 18	0-1000	0,70	Tendance à la hausse.
	1000-2000	0,75	Baro. le 21 : 761,6 762,9 762,8.
	2000-3000	0,55	
22 juillet 18	0-1000	0,45	Nouvelle baisse.
	—2000	0,65	Baro. le 22 : 762,3 759,4 758,2.
	—3000	0,80	
10 août 18	0-1000	0,5	Baisse impossible.
	—2000	0,65	Baro. le 10 : 769,3 769,3 769.
	—3000	0,15	
11 août 18	0-1000	0,3	Baisse faible.
	—2000	0,4	Baro. le 11 : 769,6 767,2 765,9.
	—3000	0,45	
12 août 18	1-1000	0,6	Le baromètre variera peu.
	—2000	0,45	Baro. le 12 : 766,7 766,2 765,7.
	—3000	0.3	Voir le 13 août.
13 août 18	0-1000	0,4	Baromètre stationnaire.
	— 2000	0,6	Baro. le 13 : 768,7 769 768,6.
	—3000	0,4	
14 août 18	0-1000	0,35	Le baromètre descendra.
	—2000	0,10	Baro. le 14 : 767,9 765,8 763,9.
	—3000	0,70	
15 août 18	0-1000	0,25	Le baromètre restera stationnaire.
	—2000	0,60	Baro. le 15 : 764,1 764,1 763,7.
	—3000	0,50	

Il est regrettable que les données des sondages par aéroplane soient encore peu nombreuses. Si les remarques faites ci-dessus

pouvaient recevoir une plus ample confirmation l'aviation pourrait à son tour contribuer à la prévision du temps. J'ai examiné récemment des sondages pratiqués à Lindenberg ou sur le lac de Constance soit par ballons-captifs soit par cerfs-volants. S'il reste toujours vrai qu'un gradient thermique croissant avec l'altitude est de mauvaise augure je n'ai pu rien conclure d'un gradient thermique à peu près constant. Il est vrai que les sondages examinés sont de plus longue durée que celui de l'aéroplane et que les températures des différentes couches varient avec le temps.

CHAPITRE III

Ballons-pilotes

Comme leur nom l'indique les ballons-pilotes sont des ballons de petites dimensions utilisés pour établir préalablement le chemin d'aérostats plus volumineux. Ainsi conçus ces ballons remontent à l'origine même de l'aérostation. En particulier, au siège de Paris (1870) des ballons-pilotes précédèrent le départ des ballons montés historiques.

A vrai dire les ballons-pilotes utilisés dans un but scientifique sont les contemporains des ballons-sondes et l'idée des uns fit naître celle des autres, surtout après la généralisation des visées et l'adoption du caoutchouc comme enveloppe élastique. Mais en 1902, R. Assmann laisse entrevoir que des ballons en caoutchouc s'élèvent avec une vitesse sensiblement constante (1). En 1903, Hergesell propose une formule théorique donnant la vitesse ascensionnelle de pareils ballons : $V = V_0 \sqrt[6]{\frac{p_0}{p}}$ et calcule le rapport $\frac{V}{V_0}$ pour les différentes altitudes (2). La formule d'Hergesell devait être soumise à des vérifications expérimentales ; elles eurent lieu à l'air libre à Strasbourg, en utilisant la plate-forme de la cathédrale (3) ou par doubles et triples visées (4). La constance approchée de la vitesse fut aussi recherchée dans les en-

(1) Voir comptes-rendus de la Conférence de Berlin. 1902.

(2) L'établissement d'une pareille formule est détaillé dans l'illustrierte aeronautische Mitteilungen. 1903, page 163.

(3) On mesurait le temps qu'un ballon mettait pour arriver au niveau de la plate-forme.

(4) Rotzoll. Zur Verwendung von Pilotballonen im Wetterdienst. 1912. Springer in Berlin.

droits clos par de Quervain dans l'église cathédrale de Zurich, par Hergesell dans la Bibliothèque universitaire et régionale de Strasbourg, par Hesselberg et Birkeland dans une église de Christiania.

Il résulte de tous les travaux entrepris à ce sujet que la vitesse ascensionnelle des ballons en caoutchouc présente des problèmes et que la constance entrevue n'est pas entièrement réalisée. Toutefois, dès 1905, les sondages par ballons-pilotes se généralisèrent. A Strasbourg de tels ballons sont visés dès mars 1905 avec le théodolite de Quervain. En 1906 les visées se pratiquaient en différents points de l'Allemagne, en Suisse, en France, en Angleterre, etc., En août 1907 la haute atmosphère était explorée en Egypte, par ballons-pilotes (1). Le 31 janvier 1908 on lança à Aix-la-Chapelle le premier pilote de nuit avec lumière électrique intérieure (2)

Les grands services que cette méthode rapide de l'exploration de la haute atmosphère a rendus pendant la guerre sont connus ; la preuve en est dans la rapide multiplication des postes de sondage. Dès le début les C^ies^ d'aérostiers sont pourvues d'un de ces postes et les batteries de canonniers marins leur demandent aussitôt la mesure du vent en altitude. Au mois de mars 1916 l'artillerie réclame des postes de sondages. Satisfaction leur est donnée aussitôt et à la fin de 1917 plus de 60 postes étaient spécialement affectés à l'artillerie (3).

I. — Le Sondage par ballon-pilote. — Admettons pour l'instant, comme on le fait d'ordinaire qu'un petit ballon de caoutchouc, gonflé d'hydrogène et possédant une force ascentionnelle connue, soit 150 grammes, s'élève avec une vitesse constante de 200 mètres-minute. Ce ballon est suivi avec le théodolite spécial donnant toutes les demi-minutes son azimut et sa hauteur angulaire. Il est donc possible de trouver la projection horizontale de la marche d'un tel ballon.

Supposons en effet que le ballon parti de A *(fig. 1)* soit visé dans un azimut à une hauteur connue h sous un angle α

On a AC $=$ h cotg α. Si donc on porte, chaque demi-minute, dans

(1) Illustrierte aeron. Mitt. 1908 p. 48.

(2) Deutsche Zeitschrift für Luftschiffahrt. 1910, n° 20, p. 38.

(3) Bulletin de la météorologie aux Armées. Janvier 1918.

l'azimut trouvé des longueurs proportionnelles aux différentes valeurs de AC on obtiendra aisément une projection horizontale de la marche du ballon *(fig* 2). De cette projection il est facile de

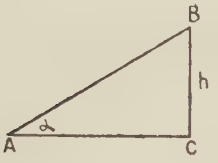


Fig. 1

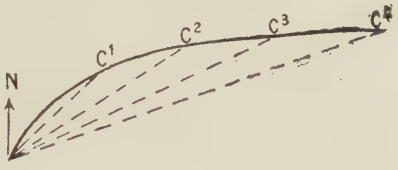


Fig. 2

conclure à la vitesse et à la direction moyennes du vent aux différentes altitudes.

Avec un personnel suffisant et expérimenté, un sondage jusqu'à 6000 mètres peut être exécuté en moins d'une heure et les résultats transmis dans toutes les directions par T. S. F. Il n'est pas rare d'atteindre 10.000 et 15.000 mètres par temps clair et vents modérés. Le 9 mars 1918 j'ai pu suivre un ballon pilote jusqu'à 27.600 m. de hauteur, la dernière visée donnant une projection horizontale de 78.350 m. Les qualités optiques du théodolite prolongent naturellement la durée du sondage et permettent d'excellentes visées.

Les données d'un sondage par ballons-pilotes dépendent de deux facteurs.

Dans l'expression $AC = h \cot g \alpha$ la projection horizontale dépend de l'angle α (1) et surtout de la hauteur verticale h.

Arrêtons-nous sur l'exactitude de l'altitude h qui dépend de la constance de la vitesse ascensionnelle du ballon.

II. — Vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes. — L'exactitude du graphique construit d'après les données d'une visée de ballon-pilote dépend non seulement de l'approximation des lectures faites sur les verniers, mais aussi de la *constance de la vitesse ascensionnelle.*

Nous avons admis jusqu'ici que la vitesse verticale du ballon était une constante ; or la constance de cette vitesse est l'élément fondamental du sondage à un seul théodolite, d'où l'intérêt qui résulte d'une détermination exacte de cette donnée.

(1) Voir pour les erreurs de lecture concernant l'angle α : Cave, The structure of the atmosphere in clear weather. 1912.

Le résumé de quelques travaux montrera que la question est loin d'être résolue à fond.

Nous avons vu que dès 1905 on cherchait à déterminer à Strasbourg la vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes. On expérimenta d'abord dans des lieux fermés.

Les premiers travaux systématiques sur la vitesse ascensionnelle d'une sphère sont de A. de Quervain dans la grande nef de la cathédrale de Zurich (1) ; ils aboutissent à la conclusion suivante : $V = K\sqrt[3]{A}$

V = vitesse ascensionnelle,
A = force ascensionnelle.

A la suite d'expériences réalisées à Strasbourg, en 1908, Hergesell cherche aussi une relation entre la vitesse ascensionnelle d'un ballon, son poids, et sa force ascensionnelle.

Les expériences d'Hergesell, quoique sujettes à critique (2), ont servi longtemps, d'une manière presque exclusive à la mesure des vitesses ascensionnelles, il est donc utile d'indiquer comment il a exprimé ses résultats.

Une vitesse ascensionnelle constante exige qu'à tout instant la résistance de l'air R soit égale à la force ascensionnelle A du ballon ; donc $A = R$.

Mais la résistance de l'air est fonction de la section du ballon S et de sa visite ascensionnelle. On peut donc poser :

$$A = \varphi(S)\, F(V)$$

$$\text{d'où } F(V) = \frac{A}{\varphi(S)}$$

$$V = F\left(\frac{A}{\varphi(S)}\right) \quad (1)$$

Or la section S dépend de A et de B. On a en effet :

$$\text{poussée de l'air} = A + B = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \quad (2) \quad (B = \text{poids du ballon})$$

$$\text{et} \qquad S = \pi r^2 \qquad (3)$$

En éliminant r entre les deux équations (2) et (3) on a :

$$S = m\,(A + B)\,\frac{2}{3}$$

(1) Ann. der schweiz. Meteor, 1907. Anhang 6, ou die Technik der Pilotballonaufstiege. Ill. aeron. Mitteil, 1907. S. 493.

(2) Hergesell. Die Bedeutung der Pilotballonaufstiege für die praktische Aerologie. Mémoire présenté à la 6e réunion de la commission internationale (Monaco, 1909).

L'équation (1) devient :

$$V = F\left(\frac{A}{\varphi\,(A+B)^{\frac{2}{3}}}\right)$$

F et φ sont des fonctions inconnues. La plus simple hypothèse est de poser $\varphi = (A+B)^{\frac{2}{3}}$

Trois séries d'expériences dues à Hergesell permettent de construire V en fonction de $\frac{A}{(A+B)^{\frac{2}{3}}}$, mais on obtient 3 courbes qui se confondent seulement pour de faibles valeurs de $\frac{A}{(A+B)^{\frac{2}{3}}}$ L'hypothèse est donc à rejeter.

On obtient un meilleur résultat en prenant pour φ la forme parabolique : $\varphi = (A+B)^{\frac{2}{3}} - k\,(A+B)^{\frac{4}{3}} = q - k\,q^2$

Hergesell a déterminé par tâtonnements la valeur de k telle que la coïncidence des 3 courbes ait lieu sur toute leur longueur. On a alors une courbe dont l'allure est représentée par la figure suivante, en adoptant comme l'a fait Hergesell $k = 0{,}8$ (*fig. 3*).

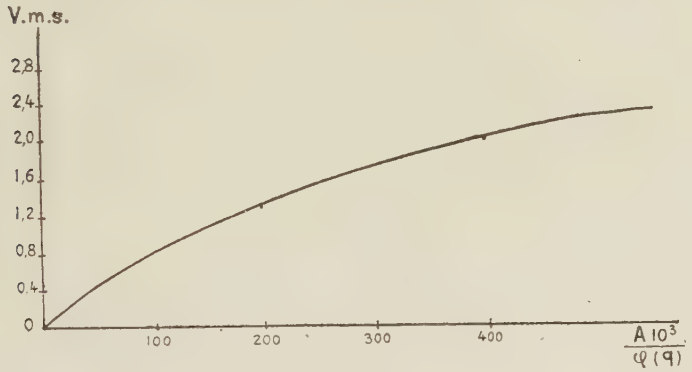


FIG. 3

Elle donne les valeurs de V en fonction de $\frac{A}{q - k\,q^2}$

A et B étant donnés il est facile, d'après cette courbe, de déduire la valeur correspondante de V.

La valeur de V ainsi calculée n'est acceptable que pour des valeurs des abscisses comprises entre les limites des observations ou pour $q < 0{,}374$. Afin de déterminer des valeurs de V correspondant

à de plus grandes valeurs de q, Hergesell prend par exemple un ballon de poids B = 1^k, 28, il lui donne une force ascensionnelle A = 0^k, 5 et il mesure sa vitesse V = 3, 68.

D'après la 1re figure, à cette vitesse de 3, 68 correspond une valeur de $\frac{A}{\varphi(q)} = 0{,}848$ d'où $\varphi(q) = \frac{0{,}5}{0{,}848} = 0{,}589$.

Dans les conditions de l'expérience $q = (A + B)\frac{2}{3} = 1{,}47$.

Avec ces éléments, Hergesell construit une courbe de φ (q) d'abord pour les valeurs de q correspondant aux premières séries d'expériences et il la prolonge jusqu'à φ (q) correspondant à l'expérience précédente.

Avec plusieurs expériences il est possible de construire une courbe complète de φ (q) (*fig. 4*).

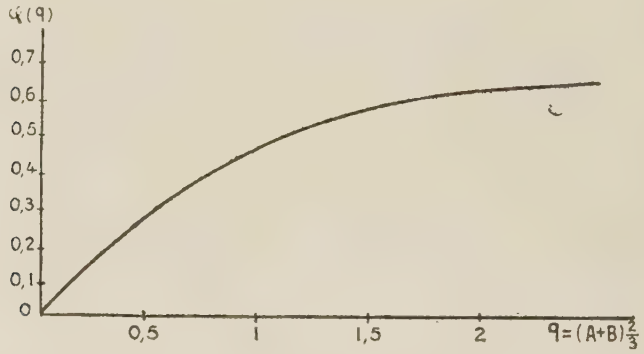


Fig. 4

Pour calculer V on commence à calculer φ (q) au moyen de la 2e courbe, on en déduit $\frac{A}{\varphi(q)}$ et prenant cette valeur comme abscisse dans la 1re courbe, on en déduit la valeur de V en m. sec.

Pour les besoins de la pratique, Hergesell a dessiné un abaque plus commode qui permet de trouver très rapidement la force ascensionnelle qu'il faut donner à un ballon de poids connu pour avoir une vitesse déterminée (1).

En 1912, (2) deux physiciens, B.-J. Birkeland et Th. Hesselberg, représentant la résistance de l'air au mouvement d'une sphère

(1) Voir comptes-rendus de la 6e réunion à Monaco, 1909.

(2) Beitrag z. Phys. d. fr. Atmosph. 1912, IV. S. 195-216.

par $R = A = q\,\rho\,V^2\,D^2$ en déduisent, si la masse spécifique de l'air est 0,0012

$$V = \sqrt{\frac{1}{0{,}0012\,q}}\ \frac{\sqrt{A}}{D}$$

posant $\sqrt{\frac{1}{0{,}0012\,q}} = a$

on a $V = \frac{a\sqrt{A}}{D}$

Si les mesures sont faites dans un milieu de masse spécifique différente ρ, on doit utiliser

$$V \text{ m. sec} = a\ \sqrt{\frac{0{,}0012}{\rho}}\ \frac{\sqrt{A}}{D}$$

ou en mètres minutes $V = 60\ a\ \sqrt{\frac{0{,}0012}{\rho}}\ \frac{\sqrt{A}}{D}$

Il est facile d'établir la similitude des formules B. J. Birkeland et Hergesell.

Appelons δ la masse spécifique du gaz de remplissage et ρ celle de l'air et introduisons le poids du ballon B.

On a : $\frac{\pi}{6} D^3 (\rho - \delta) = A + B$ (1)

$$\rho - \delta = \rho\left(1 - \frac{\delta}{\rho}\right) = \rho\left(1 - \frac{2}{29}\right)$$

$$\rho - \delta = \frac{0,0011}{0,0012}\,\rho$$

Portant cette valeur dans l'équation (1)

il vient : $\frac{\pi}{6} D^3 \frac{0,0011}{0,0012}\,\rho = A + B$

$$D^3 = \frac{A + B}{\frac{\pi}{6}\,\frac{0,0011}{0,0012}\,\rho}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{A + B}{\frac{\pi}{6} \times \frac{0,0011}{0,0012}\rho}}$$

Si l'on introduit cette valeur dans la formule de Birkeland et Hesselberg il vient :

$$V = 60\ a \sqrt{\frac{0.0012}{\rho}}\ \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{\dfrac{A+B}{\dfrac{\pi}{6}\dfrac{0,0011}{0,0012}\rho}}}$$

$$V = 60\ a \sqrt{\frac{0,0012}{\rho}}\ \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}\frac{0,0011}{0,0012}\rho}\ \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B}}$$

Posons : $60\ a \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \times 0,0011} = c$

il vient : $V = c \sqrt{\frac{0,0012}{\rho}}\ \sqrt[3]{\frac{\rho}{0,0012}}\ \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B}}$

$$V = c \sqrt[6]{\frac{0,0012}{\rho}}\ \frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A+B}}$$

Ainsi la formule de Hesselberg se transforme en celle de Hergesell avec un changement de coefficient.

Il est certain que $\sqrt[6]{\frac{0,0012}{\rho}}$ peut être négligé si on n'opère pas au-dessus des montagnes.

Il faut remarquer en passant que Birkeland et Hesselberg observent déjà des variations anormales du coefficient a pour de faibles variations de A et de D. Ils attribuent ce fait à des erreurs que Wenger expliquera plus tard en introduisant la notion de l' « **agitation tourbillonnaire** ».

A la suite de nouveaux travaux sur la résistance des fluides, Birkeland et Hesselberg publient en 1913 de nouvelles conclusions basées :

1° Sur les expériences de ballons-pilotes.

2° Sur la vitesse descendante dans l'air d'une boule de celluloïd.

3° Sur la vitesse descendante d'une boule dans un aquarium.

4° Sur la vitesse descendante d'une boule de croquet dans la mer.

Les conclusions de ces travaux sont les suivantes :

1° La règle de Newton que la résistance au mouvement est proportionnelle au carré de la vitesse est applicable avec une grande

approximation aussi bien pour l'air que pour l'eau dans la limite 50-500 cm. sec.

2° La règle que la résistance est proportionnelle au carré du diamètre de la sphère n'a de valeur que sous certaines réserves : pour les diamètres inférieurs à 60 cm., il faut prendre une constante $q = 2,7 \times 10^{-4}$. Pour les diamètres supérieurs à 130 cm. $9 = 1,9 \times 10^{-4}$.

Entre 60 cm. et 130 cm. nous avons pour q différentes valeurs.

3° Pour l'air et l'eau la résistance au mouvement d'une sphère est proportionnelle à la densité du milieu.

4° La formule qui est basée sur ces 3 règles.

$$R = q \rho V^2 D^2$$

semble pouvoir permettre de déduire la vitesse ascensionnelle limite si en même temps on trace un abaque des valeurs de q en fonction de V et de D.

Ces nouveaux travaux n'apportent aucune précision sur la vitesse ascensionnelle d'un ballon-pilote puisque le coefficient q est une variable.

Dans la même année 1913, J. S. Dines (1), à la suite de nombreuses expériences faites dans un hangar de dirigeable, présente une nouvelle formule sur la vitesse ascensionnelle d'un ballon-pilote :

$$V = 84 \frac{F^{\frac{1}{2}}}{(F+P)^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

Dines indique aussi qu'un ballon lesté monte plus vite qu'un ballon non lesté (toutes choses étant égales d'ailleurs). Peut-être y a-t-il une modification de la résistance tenant à la forme de la surface ? Un ballon lesté peut être vaguement assimilé à un corps sphérique avec pointe arrière, pour lequel, comme l'a montré Eiffel (3), le coefficient de résistance K diminue sensiblement. Ce même coefficient diminue aussi pour des montants d'aréoplane à section fuselée, il augmente avec des sections circulaires.

Quelle que soit la valeur de ces formules théoriques, elles ne

(1) J. S. Dines, Quartely Journal of. the royal met soc. avril 1913.

(2) V = vitesse en mètres.
F = force ascensionnelle en grammes.
P = poids du ballon en grammes.

(3) Eiffel, *Résistance de l'air et l'aviation*, page 76.

donnent aucun résultat concordant exactement avec la réalité à l'air libre (1).

On sait que la table d'Hergesell donne pour la vitesse ascensionnelle des ballons une plus grande valeur que celle de Hesselberg et Birkeland ; mais à l'air libre la vitesse est encore plus grande que celle qui résulte des tables d'Hergesell. C'est ainsi qu'un ballon de 103 gr., avec une force ascensionnelle de 108 gr. atteint d'après Hergesell une vitesse ascensionnelle de 192 m. min. et d'après Hesselberg et Birkeland 177 m. A l'air libre, d'après 73 doubles visées faites à Lindenberg, elle atteint une vitesse moyenne de 201 m. par minute. Cet accroissement de la vitesse ascensionnelle est particulièrement grande dans les couches voisines du sol. Par contre dans la stratosphère on constate une chute de vitesse ascensionnelle.

Comment expliquer les divergences entre les vitesses théoriques et les vitesses vraies? Voyons quel peut-être le rôle des *courants verticaux*, des *vagues* et *des tourbillons*.

III. — Courants verticaux. — Vagues. — Tourbillons. — Dès 1908, C.-H. Ley observait des ascensions accélérées de ballons-pilotes au-dessus des monticules ; cette accélération fut encore constatée dans des couches dont l'élévation dépassait de 10 à 15 fois l'élévation des monticules. Certainement des courants particuliers faussaient la vitesse ascensionnelle (2).

En 1909, R. Bornstein (3) entrevoit l'influence des courants verticaux dans l'air : « A la limite de deux couches d'air superposées « existent des phénomènes semblables à ceux de la surface de la « mer dont la ligne de dos est perpendiculaire à la direction du « vent. Ces vagues d'air dont nous devons la connaissance à « Helmholtz donnent lieu à des bandes nuageuses qui apparaissent au ciel en lignes parallèles et qui résultent de ce qu'au « sommet des vagues il y a condensation et formation de nuages

(1) Wenger, Annalen der Hydrogr. und maritimen Meteorologie 1917, page 121.

(2) Cap. Ley. The possibility of a topography of the air based on balloon observations with special theodolites. Quart. Journal R. met. soc. London 1908. S. 127.

(3) R. Bornstein. Ueber einige Pilotbeobachtungen. Meteor. Zeitschrift. 1909, page 396.

« pendant que dans le creux des vagues le mouvement descendant « de l'air amène l'évaporation de ces petits nuages et laisse voir « le ciel bleu sur des bandes aussi parallèles. Sans doute de telles « vagues peuvent exister souvent sans que les bandes nuageuses « apparaissent, surtout si l'humidité de l'air n'est pas suffisante. « Un ballon-pilote peut donc se trouver soit dans une partie as- « cendante des vagues, soit dans une partie descendante ce qui « amène une modification de sa vitesse ascensionnelle.

De pareilles vagues atmosphériques avaient été signalées aussi par G. Millochau, de l'Observatoire de Meudon (1). « On sait que notre « atmosphère est en état de perpétuelle agitation, il s'y forme de « véritables vagues dont le déplacement gêne les observations as- « tronomiques. Ces vagues peuvent être classées en trois groupes « principaux :

« 1° Ondulations très petites avec mouvement de translation ra- « pide ; elles doivent exister dans les hautes régions de l'atmos- « phère.

« 2° Vagues assez grandes avec rapide mouvement de translation.

« 3° Vagues très grandes avec petit mouvement de translation. »

En 1911, W. Peppler (2), à la suite de visées doubles à Lindenberg, montre qu'à l'état libre les ballons-pilotes montent plus vite par vent fort que par vent faible. Il justifie le fait en disant que les forts courants horizontaux font un appel d'air des couches les plus tranquilles vers les couches les plus rapides, mais celles-ci doivent perdre à la longue une partie de leur vitesse, alors l'inverse se produit d'où l'origine des courants verticaux.

En 1912, J. S. Dines (3) fait remarquer qu'il est tout-à-fait inexact de calculer la vitesse ascensionnelle de chaque ballon dans l'hypothèse qu'elle dépend exclusivement de son diamètre et de sa force ascensionnelle ; les variations de cette vitesse dépendent des courants verticaux et surtout des mouvements tourbillonnaires au contact des deux couches. D'un autre côté Dines a précisément voulu expliquer l'accélération au voisinage de la terre par des courants ascendants en montrant que le courant horizontal, au voisinage de la terre doit être nécessairement dirigé de la base des courants

(1) *Bulletin de la Société astronomique de France*, 1905, p. 405.

(2) W. Peppler. Zur Kenntniss der vertikalen Luftbewegungen. Arbeiten des Kgl. Aern. Obs. bei Lindenberg, 1911, S. 243 à 252.

(3) J. S. Dines. Aeronautics, 3, report on vind structure, London 1912.

descendants vers les courants ascendants, par le fait un ballon lancé du sol parvient d'abord dans un courant ascendant.

En Italie on s'est aussi préoccupé de l'exploration de la haute atmosphère.

Dès 1903, à Pavie, on lançait des ballons-sondes sous la direction du professeur L. Pallazzo, directeur du Bureau central de météorologie et de géodynamique de Rome. Ces sondages furent continués soit à Rome, soit à Pavie, soit à Castelfranco-Veneto. Les ballons-sondes sont suivis soit au théodolite Wurtzell soit plus tard au théodolite de Quervain (1).

Le Bureau central italien continua dans l'année 1906-1907, (2) comme dans les précédentes à donner sa contribution à l'entreprise internationale des explorations de la haute atmosphère à son observatoire de Pavie. On y essaya les cerfs-volants. Le professeur Gamba exécuta à Pavie des lancers de ballons-sondes et de ballons-pilotes. Quelques autres lancers furent exécutés à Milan, pendant l'été 1906, à l'occasion de l'exposition.

Mais la 1re étude systématique des ballons-pilotes, pour la vérification de la vitesse ascensionnelle est publiée par C. Alessandri (3). Les expériences sont du 24 août et du 11 septembre 1910. La station du lancement des ballons-pilotes est à l'altitude de 1857 m. (Alpe Sofezaz). De la cabane Regina Margherita, plus élevée de 2703 mètres et distante en horizontale de 4760 m., on examinait le passage à niveau des ballons-pilotes.

La vitesse théorique était donnée par la formule d'Hergesell, la vitesse moyenne était obtenue en divisant 2703 m. par la durée d'ascension. Les résultats sont les suivants:

Date.	Heure.	Poids du ballon.	Force ascens.	Vitesse théor.	Vitesse moyenne.
24 août.	7 h. 36	29 gr.	120 gr.	174 m. min.	173,2 m. min.
Id.	9 h. 13	29 —	131 —	180 —	191 —
11 sept.	9 h. 4	29 —	150 —	189 —	194 —
Id	11 h. 9	29 —	145 —	187 —	181,4 —

L'auteur se déclare satisfait de la concordance entre la vitesse théorique et la vitesse moyenne et attribue les différences à des *courants ascendants* ou *descendants* d'intensité modérée.

(1) Annali del'Ufficio meteorologico geodinamico italiano. 1906, vol. XXVIII, Parte I.

(2) Annali. — Parte II

(3) Annali vol. XXXIII. Parte 1-1911

En 1912-13 A. Gamba et A. Viterbi se livrent à une série de visées à double théodolite dont ils discutent à fond les résultats. Voici les conclusions de leurs travaux (1) :

1° La vitesse verticale vraie des ballons-pilotes est généralement supérieure à celle qui leur est assignée par la formule d'Hergesell.

2° Dans les couches les plus basses de l'atmosphère (troposphère), étant données les conditions atmosphériques de nos lancers, domine une composante verticale positive (ascendante) du mouvement de l'air. Une telle composante présente une plus faible intensité dans les couches supérieures, où se manifestent toujours plus fréquentes, avec l'accroissement de l'altitude, les valeurs négatives descendantes. On peut aussi retenir qu'au-dessus de 3000^{m} domine un courant vertical descendant (négatif). Nous ne pouvons rien dire avec certitude pour les couches les plus élevées.

3° Les déplacements d'air aux diverses altitudes subissent une perturbation dont les effets se font sentir à une hauteur moyenne d'environ 1000^{m} accompagnée d'nne notable diminution de vitesse horizontale et d'une vitesse verticale descendante (négative).

4° Ce sont les petites valeurs de la composante verticale qui prédominent. Les valeurs positives (courant ascendant) atteignent des valeurs supérieures aux négatives, au moins dans les couches inférieures de l'atmosphère et toujours pour les conditions météorologiques que nous avons rencontrées.

5° Il existe une relation constante et bien définie entre les variations de la pression atmosphérique au sol et le mouvement vertical qui se manifeste dans l'air en ce moment, particulièrement dans les couches inférieures.

6° La formation de cumulus est accompagnée constamment d'un notable mouvement vertical ascendant de l'air qui les porte.

Il résulte des conclusions des professeurs Gamba et Viterbi *qu'on ne peut nier l'existence des courants verticaux ascendants ou descendants, positifs ou négatifs, mais de pareils courants doivent nécessairement modifier la vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes.*

A l'appui de cette affirmation citons la communication, à l'Académie des Sciences du 17 juillet 1919 (Communication de M. J. Rouch), sur la constance de la vitesse ascensionnelle d'un ballon-pilote :

(1) Annali dell'Ufficio centrale meteo. e geodinamico. — Vol. xxxi 1914.

« Nos expériences portent sur 168 sondages exécutés à 2 théo-
« dolites. Les ballons employés sont des ballons de caoutchouc de
« 50 gr. auquels on donne au départ une vitesse ascensionnelle de
« 150 gr. La vitesse moyenne observée est de 188 m. minute. Le
« tableau suivant donne pour chaque couche d'air de 1.000m les vi-
« tesses ascensionnelles moyennes ainsi que la fréquence d'écart
« de vitesse par rapport à la vitesse moyenne de chaque couche.

Couches atmosph.	Nombre d'obs.	Vitesse ascen. moyenne.	Ecarts infér. à 1/10.	Ecarts compris entre 1/10 et 2/10	Entre 2/10 et 3/10	Supérieur à 3/10.
0 - 1000m	168	198	98	46	14	10
1000 - 2000	164	184	141	21	1	1
2000 - 3000	122	184	105	16	1	0
3000 - 4000	71	186	60	10	1	0
4000 - 5000	28	186	22	4	1	1
5000 - 6000	11	188	11	0	0	0
6000 - 7000	9	190	7	2	0	0
7000 - 8000	4	196	4	0	0	0
8000 - 9000	3	198	3	0	0	0
9000-10000	2	194	2	0	0	0

« Au-dessus de 6.000 m., le nombre d'écarts est très faible, mais
« aucune observation ne donne des écarts supérieurs à $\frac{2}{10}$
« Il est donc parfaitement légitime d'admettre que la vitesse as-
« censionnelle d'un ballon-pilote est pratiquement constante
« jusqu'à une dizaine de kilomètres de hauteur.

« Dans les 1.000 premiers mètres, des *courants verticaux ascen-*
« *dants* augmentent sensiblement la vitesse ascensionnelle. Ces
« courants verticaux sont dus aux courants de convection se
« manifestant surtout pendant le jour. En groupant les son-
« dages suivant les différentes heures de la journée, la vitesse
« ascensionnelle a les valeurs suivantes :

	8 h. à 10 h.	10 h. à 12 h.	12 h. à 14 h.	14 h. à 16 h.	16 h. à 18 h.	18 h. à 22 h.
0 - 400m	212	240	236	232	188	182
400 - 800	180	202	202	203	194	174
800 - 1200	180	190	190	192	188	170
1200 - 1600	186	180	190	188	180	168
1600 - 2000	180	184	188	186	182	176

« *Les courants ascendants* se font sentir dans le milieu de la jour-
« née avec le plus de force mais ne dépassent pas en moyenne
« l'altitude de 800 mètres. »

Dans la même communication M. J. Rouch discute la formule de Dines et s'exprime ainsi :

« Divers auteurs ont proposé des abaques ou des formules pour
« déterminer la vitesse ascensionnelle V en fonction du poids du
« ballon P et de la force ascensionnelle au départ F. Une
« formule bien connue est celle de Dines :

$$V = 84 \frac{F^{\frac{1}{2}}}{(F+P)^{\frac{1}{3}}} \qquad \begin{matrix} V = \text{mètres-min.} \\ F \text{ et } P = \text{grammes.} \end{matrix}$$

« Cette formule a été vérifiée par de nombreuses expériences
« faites avec des ballons pesant moins de 20 gr. Elle ne nous a
« pas paru pouvoir s'appliquer aux ballons-pilotes que nous
« employons généralement en France et qui pèsent 50 et 91 gr.
« environ.

« Avec la collaboration de M. Parrot nous avons étudié plus de
« 200 sondages à 2 ou 3 théodolithes à l'aide de ballons de 50 gr.
« ou de 91 gr. en faisant varier la force ascensionnelle. Nous avons
« proposé la formule $V = 42 \frac{F}{(F+P)^{\frac{2}{3}}}$ P et F en gr. V en mètres-min.
« qui s'accorde avec nos expériences. Cette formule est sensible-
« ment différente de celle de Dines. Les 2 formules ne donnent la
« même vitesse que si l'on a : $P = \frac{F^{\frac{3}{2}} - 8F}{8}$ (1)
« Pour s'accorder avec les expériences que nous avons faites sur
« les ballons de 91 gr. il faudrait que le coefficient de la formule
« de Dines fût voisin de 120.

« A notre avis, la formule de Dines, établie d'après des expé-
« riences faites sur de petits ballons, convient pour des ballons d'un
« poids inférieur à 20 gr. La formule : $V = 42 \frac{F}{(F+P)^{\frac{2}{3}}}$
« paraît donner une meilleure valeur de la vitesse, surtout quand
« la force ascensionnelle est grande. Si l'on se sert de ballons d'un

(1) *Bulletin Officiel* de la Direction des Recherches Scientifiques et Industrielles et des inventions. N° 17.

« poids supérieur à 100 gr., il sera utile de déterminer la vitesse « au moyen de nouvelles expériences ».

Ainsi M. Rouch fait intervenir les courants verticaux dans les variations de la vitesse ascensionnelle, ces courants n'agissant d'après lui que dans la première couche de 800 m. Il discute ensuite la formule de Dines et propose une nouvelle formule.

Enfin d'un compte-rendu à l'Académie des Sciences du 2 février 1920, compte-rendu ayant trait aux observations faites au polygone de Gâvre, nous extrayons le passage suivant :

« Le principe de la constance de la vitesse ascensionnelle des « ballons-pilotes n'est exact qu'à partir d'une certaine hauteur, « hauteur qui varie avec les conditions météorologiques. Au dé- « part la vitesse est généralement maxima ; elle va en décroissant « d'une façon plus ou moins rapide jusqu'à ce que le ballon ait « atteint une zone de constance. La limite inférieure de cette « zone peut-être fixée en moyenne à Gâvre à 500 mètres en hiver, « à 1.500 m. en été. »

Ainsi donc nous ne pouvons compter absolument sur une formule théorique ; nombre de météorologistes accusent formellement les courants verticaux.

Disons un mot sur les tourbillons. Il est certain que lorsque deux couches d'air surperposées se meuvent dans des directions différentes, il peut se produire à leur contact des tourbillons à axe horizontal. Les météorologistes démontrent leur formation possible et les aviateurs signalent leur existence réelle (trous d'air).

En cette matière nous ne pouvons mieux faire que d'indiquer ici le travail de Wilhem Schmidt de la station centrale météorologique et géodynamique de Vienne (1).

Schmidt montre que si un ballon rencontre un tourbillon à axe horizontal il est détourné de son chemin ; de plus son mouvement à travers le tourbillon est accéléré ou retardé suivant les circonstances. Tout dépend

du rapport $\delta = \frac{v}{V} = \frac{\text{vitesse ascensionnelle du ballon}}{\text{vitesse périphérique du tourbillon}}$

et du rapport $\frac{b}{r} = \frac{\text{distance de la ligne d'ascension au centre du tourbillon,}}{\text{rayon du tourbillon.}}$

(1) Schmidt — Einfluss von Wierbeln mit horizontaler Achse auf die Steiggeschwindigkeiten von Pilotballonen (Meteorol... Zeitschrift. Band 34, 1910. Heft. 10-11.

Schmidt dresse un tableau donnant les accélérations ou les retards suivant les différentes valeurs de ces rapports.

Il conclut en disant : « Il est rare que dans l'atmophère on trouve « des tourbillons nettement géométriques, des mouvements circu- « laires nettement limités, mais on trouve souvent des vagues « comme à la surface des mers qui ont aussi leur effet sur la vitesse « ascensionnelle. »

Il est clair que des accélérations ou des retards dans la vitesse ascensionnelle peuvent modifier complètement l'allure de la projection horizontale de la marche du ballon.

On trouve en effet, à la séparation de deux couches de directions différentes des trajectoires en boucle *(fig. 5)* qui certainement n'indiquent pas les faits réels. Nous les appelons *zones de calme* alors que peut-être l'air y est profondément agité par des vagues ou des tourbillons ; mais une fausse hauteur verticale nous donne aussi de fausses projections horizontales, d'où les boucles trouvées. *(fig. 5)* Bornstein (1) fait de pareilles remarques sur des sondages effectués les 27 et 28 juillet 1909 et montre que les trajectoires des ballons-pilotes ne peuvent être exactement déterminées que par plusieurs visées.

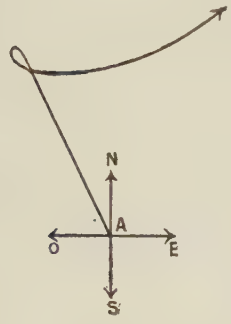


FIG. 5

Il résulte de tout ce qui précède qu'on est loin de posséder une formule théorique donnant la vraie valeur de la vitesse ascensionnelle d'un ballon-pilote. Courants verticaux, vagues et toubillons modifient cette vitesse.

Toutes les discussions sur les variations constatées dans les vitesses ascensionnelles de ces ballons n'ont pas jeté une lumière suffisante sur la cause de ces variations. Il est bon de rappeler ici comment les célèbres expériences d'Eiffel ont ouvert de nouveaux horizons à ce sujet.

(1) Bornstein, op. cit.

CHAPITRE IV

Agitation tourbillonnaire

Dès 1903 M. Eiffel (1) étudie la résistance de l'air sur les corps en mouvement. Comme la sphère est le plus simple des solides, tout laissait croire que les données sur elle seraient absolument certaines.

On sait que la formule la plus répandue pour exprimer la résistance de l'air est : $R = z \frac{\delta}{g} S V^2$

δ = poids de l'unité de volume d'air.

g = accélération, par suite $\frac{\delta}{g}$ représente la masse de l'unité de volume d'air = ρ.

V = vitesse du courant d'air.

S = surface exposée au vent.

Dans cette formule z représente un *coefficient numérique*, qui est un nombre abstrait, ne dépendant que de la forme du corps et de son orientation. *Il est même indépendant du choix des unités.* L'expérience a montré qu'il était pratiquement le même dans l'air et dans l'eau ; il parait donc aussi indépendant de la nature du fluide.

Malgré les grands avantages que présente cette formule on préfère généralement en France, et c'est ce qu'a fait M. Eiffel, poser

$$z \frac{\delta}{g} = z \rho = K \quad \text{et écrire :}$$

$$R = K S V^2$$

(1) Le mode opératoire et le résultat des expériences de M. Eiffel sont détaillés dans deux ouvrages restés célèbres :

Recherches sur la résistance de l'air faites au laboratoire du Champ de Mars.

Nouvelles recherches sur la résistance de l'air faites au laboratoire d'Auteuil. Paris, Dunod et Pinat.

Mais le coefficient K dépend de δ c'est-à-dire des conditions actuelles de température et de pression. Pour rendre les expériences comparables, Eiffel ramène toujours K à ce qu'il serait à 15° et 760 m/m, valeurs moyennes de température et de pression. A ces valeurs correspond $\delta = 1^{kg},225$, on peut alors poser :

$$K = \frac{z}{g} \times 1,225 = 0,125\ z$$

d'où $z = 8\ K$

La simplicité du facteur numérique permet de passer très facilement de z au coefficient K ou inversément.

Le fait nouveau mis à jour par M. Eiffel est que **le coefficient de résistance K varie avec la vitesse de l'air.** Pour les petites vitesses ce coefficient est assez élevé 0,03 puis il diminue rapidement pour atteindre la valeur sensiblement constante 0,01.

Il y a donc pour chaque sphère une vitesse dite critique pour laquelle le coefficient K faiblit rapidement ; de plus cette *vitesse critique* varie avec le diamètre de la sphère employée, elle diminue quand le diamètre de la sphère augmente (1).

De pareilles anomalies, dit M. Eiffel, tiennent surtout à *ce qu'il existe deux régimes d'écoulement d'air autour des sphères,* comme on peut s'en assurer en examinant la marche des filets d'air à l'aide d'un fil léger porté par une tige très mince. *Au-dessous de la vitesse critique il se forme à l'arrière un cône de tourbillons* d'une longueur presque égale au diamètre de la sphère et analogue à celui qui se produit à l'arrière des plaques frappées normalement par le vent.

Au-dessus de cette vitesse critique existe le nouveau régime pour lequel les tourbillons ont disparu et se trouvent remplacés par de l'air qui n'est relativement pas troublé, alors la résistance diminue.

Les expériences d'Eiffel ont eu leur écho immédiat en Allemagne.

Le principal laboratoire aérodynamique allemand de Gottingue, dirigé par M. Prandtl attribue au coefficient K la valeur limite 0,0275 à peu près égal à celui trouvé antérieurement par von Lossl. D'où conflit évident.

M. Eiffel ajoute : « *Aux vitesses inférieures à la vitesse critique les* « *coefficients diffèrent peu de ceux indiqués par le laboratoire de Gottin-*

(1) Eiffel avait opéré sur des sphères de diamètres 16 cm., 2 24 cm., 4 33 cm.

« gue. Si ce laboratoire n'a pas trouvé 0,011, c'est tout simplement parce « qu'il lui a été impossible d'opérer à une vitesse supérieure à 10 mètres. »

Si en effet on examine les courbes d'Eiffel (courbes donnant la valeur de K en fonction des vitesses) on doit conclure que la valeur limite de K n'est obtenue que pour des vitesses supérieures à 10 mètres, sauf peut-être pour la sphère de 33 cm. de diamètre pour laquelle, d'après Eiffel, cette valeur est atteinte pour une valeur de 10 mètres.

Examinons les arguments allemands, ils nous amènent à la notion **d'agitation de l'air**, nettement vue par Eiffel qui nous a indiqué les deux modes de distribution de flux.

Reprenons la formule $R = z\,\rho\,S\,V^2$ dans laquelle le coefficient z n'a pas de dimensions. Ce coefficient ne peut dépendre que de la vitesse du corps par rapport au milieu, de la densité, du coefficient de frottement de l'air contre le corps et d'un coefficient qui caractérise les dimensions du corps. Pour une sphère il est logique d'adopter le diamètre. Donc :

$$z = \varphi\,(V\,\rho\,\eta\,D)$$

Puisque z n'a pas de dimensions, il faut donc trouver une combinaison des facteurs précédents telle que la dimension soit zéro.

$$V = L\ T^{-1}$$
$$\rho = M\ L^{-3}$$
$$D = L$$
$$\eta = \frac{\frac{F}{S\ L\ T^{-1}}}{L}$$

Le coefficient de frottement est mesuré par la différence de pression qui existe des deux côtés d'une surface quand la variation de vitesse est égale à l'unité. De toutes les combinaisons possibles de ces grandeurs la seule sans dimensions est :

$z = \varphi\left(\frac{\rho\ V\ D}{\eta}\right)$, on donne à ce quotient le nom de *coefficient de Reynolds* que nous représenterons par N.

Dans le cas d'un fluide compressible, la compressibilité s'ajoute aux grandeurs considérées jusqu'à présent ; elle est mesurée par $\frac{d\,\rho}{d\,p}$. Ce terme a les dimensions de l'inverse du carré d'une vitesse. On sait en effet qu'il est l'inverse du carré de la vitesse du son d'après Newton. Pour que, dans ce nouveau cas, la dimension

disparaisse, il faut multiplier $\frac{d\rho}{dp}$ par V^2. On voit ainsi que z peut dépendre et du nombre de Reynolds et en outre de $\frac{d\rho}{dp} V^2$ qu'on peut aussi écrire $\left(\frac{V}{V_{son}}\right)^2$. Or cette grandeur n'a d'influence sensible qu'à partir du moment où la vitesse à laquelle le corps se meut dans le milieu devient comparable à la vitesse du son ; ce serait le cas dans les recherches sur le mouvement des projectiles. Ici où nous n'envisageons que des vitesses faibles il n'y a pas lieu de faire intervenir la compressibilité. On peut donc représenter z en fonction du nombre de Reynolds N. Les expériences d'Eiffel et celles de Gottingue se traduisent par les trois courbes suivantes : *(fig. 6)*

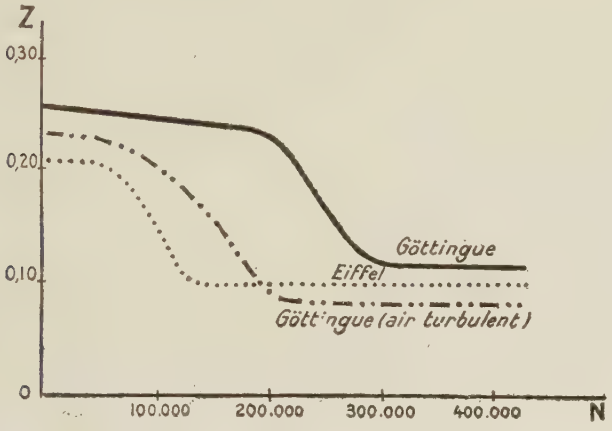


Fig. 6

On voit que lorsque N augmente z décroit d'abord lentement, ensuite très fortement. La décroissance la plus forte a lieu entre. $N = 260.000$ et $N = 300.000$. Au-delà de $N = 300.000$, z redevient constant mais sa valeur n'est plus que la moitié de celle du début. *Dans la région de transition le mode de flux est instable, il oscille entre deux modes dont l'un correspond à la grande, l'autre à la petite résistance.*

Cette diminution subite du coefficient de résistance avec l'accroissement de N avait bien été observée par Eiffel. On voit cependant d'après les expériences d'Eiffel:

1° Que z est un peu moindre.

2° Que la transition d'un mode de flux à l'autre se fait bien plus tôt cest-à-dire pour N = 130.000.

On a vu qu'Eiffel attribuait cette discordance au fait qu'à Gottingue on n'avait pu opérer sur de grandes vitesses.

Et voici qu'à Gottingue on dit :

La cause de la différence s'explique par le fait que dans les expériences d'Eiffel l'air était plus agité qu'à Gottingue.

Si à Gottingue on rendait l'air artificiellement agité on trouvait une concordance presque parfaite avec Eiffel. Dans ce but on faisait passer l'air à travers un filet de ficelle avant d'atteindre le corps à l'essai, ou plus simplement on opposait sur la sphère à une latitude de 15°, devant l'équateur de la sphère, un fil de fer de 1mm de diamètre.

On a étudié le mode de flux dans chacun des cas en introduisant de la fumée dans le canal et en photographiant l'ambiance de la sphère. On a observé que pour le 1er mode de flux, tel qu'il s'installait sans filet, la surface limite se détachait de la surface de la sphère de 5 à 8° devant l'équateur ; à l'arrière il se formait un espace rempli de tourbillons. Dans le 2e mode (cas de l'air agité) la surface limite se détachait bien plus en arrière et l'espace rempli de tourbillons était bien plus petit.

Ceci montre qu'il y avait au cours des essais en général *deux modes de flux différents* pour l'air passant sur la phère. L'un correspond à une grande résistance, l'autre à une faible résistance. Le nombre de Reynolds augmentant, le 1er mode faisait place au second. L'agitation tourbillonnaire avait donc un double effet :

1° Une augmentation d'agitation faisait décroître le coefficient de résistance.

2° L'agitation favorisait l'installation du 2e mode de flux de sorte que ce mode apparaissait déjà pour des nombres de Reynolds plus petits.

Telles sont les conclusions des recherches de Gottingue. Si elles sont exactes nous voyons déjà comment notre ballon-pilote éprouvera de la part de l'air une résistance variable avec l'agitation tourbillonnaire rencontrée dans les différentes couches atmosphériques.

Mais demandons-nous d'abord le crédit qu'il faut accorder aux expériences de Gottingue.

Il a été créé récemment à Saint-Cyr un Institut aérotechnique dû à la générosité de M. Deustch de la Meurthe. Cet Institut continue, sous une nouvelle forme, il est vrai, les expériences d'Eiffel et celles de Gottingue. Or M. Toussaint, Directeur de l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, publie dans la *Revue générale des Sciences* du 15 avril 1921 un article d'où il ressort nettement que le degré d'agitation influe sur le coefficient de résistance z. « Pour des sphères et « pour tous les corps sur lesquels les filets fluides décollent en un « certain point du contour on observe que des variations rapides « du coefficient z en fonction de la caractéristique V L (1) se pro- « duisent pour des valeurs d'autant plus élevées de V L que le cou- « rant d'air est moins *turbulent*. Nous avons trouvé récemment les « résultats de M. Prandtl en mesurant la résistance de l'air sur des « sphères à des vitesses de courant d'air allant jusqu'à 80-90 m. « sec. Nous avons constaté que la diminution rapide du coefficient « z se fait au voisinage de $VL = 2,1$ alors que pour les expériences « de MM. Eiffel et Maurain cette diminution rapide de z avait lieu « au voisinage de $V L = 1,1$ sous une forme d'ailleurs moins ac- « centuée. Dans les expériences de M. Prandtl le même phénomène « se produisait au voisinage de $V L = 2$. En plaçant à l'entrée de « la soufflerie un filtre régulateur nous avons constaté la diminu- « tion rapide de z pour $V L = 1,1$. *Ainsi la structure des courants « d'air artificiels utilisés dans les laboratoires aérodynamiques peut « avoir une grande répercussion sur les mesures.* Il y aurait lieu de « déterminer des dispositions pour les filtres régulateurs telles « qu'elles ne donnent pas de *turbulence.* »

Il semble donc qu'il faille donner crédit aux expériences de M. Prandtl et tenir compte de l'agitation tourbillonnaire dans l'évaluation de la résistance de l'air sur une sphère.

Et c'est pour cela que R. Wenger (2) a voulu montrer que les variations de vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes pouvaient

(1) Cette valeur caractéristique VL est en quelque sorte une abréviation du nombre de Reynolds qui est égal à $\frac{\rho V L}{\eta}$, η étant le coefficient de frottement. Comme il s'agit en général de comparer les résultats d'expériences faites dans le même fluide, l'air, on peut, pour simplifier remplacer le nombre de Reynolds par VL.

(2) R. Wenger. Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie 1917. S. 121.

être absolument attribuées à l'état d'agitation tourbillonnaire des couches traversées. A cet effet Wenger établit qu'entre le coefficient de résistance et le chiffre de Reynolds, on doit avoir, *dans le cas d'une ascension uniforme :*

$z\,N^2 =$ constante.

En effet, il faut poser, pour une ascension de vitesse uniforme :

$$R = A \quad \left\{ \begin{array}{l} R = \text{résistance de l'air.} \\ A = \text{force ascensionnelle.} \end{array} \right.$$

$$z\,\rho\,S\,V^2 = A$$

d'où $z = \dfrac{A}{\rho\,S\,V^2}$ et on peut le déterminer expérimentalement.

Introduisons le nombre de Reynolds N.

$$z\,N^2 = \frac{4\,A\,\rho}{\pi\,\eta^2}$$

A est ici une constante. Dans une couche où ρ et η peuvent être considérés comme constants toutes les valeurs de z et de N, pour une force ascensionnelle donnée, devraient être situées sur l'hyperbole cubique.

$$z\,N^2 = C^{te}.$$

Pourtant on peut voir par des essais qu'il y a des valeurs préférées pour les coefficients de résistance. Les points ne se répartissent pas uniformément sur les courbes définies par l'équation ci-dessus. D'après les essais de Birkeland et Hesselberg, on distingue nettement deux tassements correspondant l'un à de grandes valeurs de z ($z = 0{,}38$), l'autre à de plus petites valeurs de z, ($z = 0{,}25$). Entre ces deux groupes on ne peut remarquer que très peu de points. La transition entre ces deux groupes se fait environ pour les valeurs de N indiquées par Eiffel et aussi par Prandtl dans le cas où le courant d'air est artificiellement troublé et cette transition est plus rapide si l'air est artificiellement agité, en entourant les ballons d'un filet ainsi que l'ont constaté Hesselberg et Birkeland.

Pour des ballons s'élevant librement le coefficient de résistance z passe rapidement d'une valeur plus grande à une valeur plus petite quand le nombre de Reynolds augmente et cette transition est favorisée par l'agitation de l'air. Il est permis d'admettre que cette transition, comme pour la sphère dans le canal aérodynamique est accompagnée d'un changement de mode de flux, changement facilité par l'agitation.

En résumé, la résistance de l'air dans l'ascension d'un ballon-

pilote diminue avec l'accroissement *du nombre de Reynolds* et *de l'agitation tourbillonnaire.*

Après de pareilles constatations, ajoute R. Wenger, on peut facilement expliquer les variations de vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes par des différences dans l'agitation de l'air. La différence entre les résultats d'Hergesell d'une part et de Hesselberg d'autre part pourrait résulter du fait que dans le local employé par Hergesell *l'agitation* était plus grande que dans celui où ont opéré Hesselberg et Birkeland.

Le fait que les ballons montent dans l'air libre encore plus vite que d'après la formule d'Hergesell pourrait s'expliquer par une plus grande *agitation* de l'air libre, ce qui est très plausible.

Le fait que les ballons montent plus vite dans les couches atmosphériques inférieures pourrait être considéré comme conséquence de la grande *agitation* provoquée par le frottement à la surface du sol et, inversement, le fait que la vitesse ascensionnelle dans la stratosphère est plus petite pourrait s'expliquer en admettant que le flux dans cette couche s'écoule plus régulièrement comme l'a admis A. Wegener.

Les oscillations de la vitesse ascensionnelle auraient lieu dans le régime de transition pour lequel l'air entourant le ballon peut subir l'un ou l'autre des deux modes de flux.

La relation entre la vitesse ascensionnelle et la vitesse du vent trouvée par W. Peppler pourrait se comprendre en faisant l'hypothèse très plausible que dans un fort courant d'air *l'agitation* est bien plus grande que dans un courant faible.

Les résultats de C.-H. Ley s'expliqueraient par l'agitation tourbillonnaire provoquée par les aspérités du sol.

Au point de vue quantitatif l'influence de l'agitation suffit complètement pour expliquer tous les phénomènes.

La valeur de z oscille entre le simple et le quadruple, les valeurs correspondantes de la vitesse peuvent facilement varier du simple au double.

Puisque les différences d'agitation tourbillonnaire provoquent de si grandes variations de la vitesse ascensionnelle, il n'est pas permis de conclure de ces variations à des mouvements verticaux de l'air. Au contraire, on peut espérer qu'on pourra conclure de ces oscillations au degré d'agitation.

*
* *

Examinons encore un nouveau travail de Th. Hesselberg et B. J. Birkeland. (1)

On se rappelle qu'en 1912 ces deux météorologistes avaient établi la formule suivante pour la vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes.

$$V = a \sqrt{\frac{0.0012}{\rho}} \frac{\sqrt{A}}{D}$$

« Dans notre travail antérieur sur les vitesses ascensionnelle des « ballons dans les locaux fermés, disent-ils, nous avons résumé « nos observations en représentant le coefficient a en fonction du « diamètre du ballon D et de la force ascensionnelle A. Or, d'après « Dines, il est plus judicieux de séparer les ballons lestés des bal- « lons non lestés. On doit en outre, d'après Wenger, grouper les « résultats d'expériences suivant les valeurs du nombre de Rey- « nolds. Nous avons soumis les données des sondages à un nouvel « examen à ces deux points de vue. Nous ne nous sommes pas li- « mités à nos propres observations et nous avons examiné les ex- « périences de de Quervain, de Hergesell et de Dines. »

Le nouveau travail de Th. Hesselberg et de B. J. Birkeland peut se résumer ainsi :

1° Il y a pour les locaux fermés deux valeurs du coefficient a et ces deux valeurs dépendent du chiffre de Reynolds.

Pour N < 130.000 a = 16,5

Pour N > 200.000 a = 19,4

et cela pour des ballons non lestés.

Le même fait existe pour les ballons lestés, mais on doit prendre alors pour N < 130.000 a = 16,9 pour N > 200.000 a = 20,8

Entre R = 130.000 et R = 200.000, pour les ballons non lestés, on peut dresser le tableau suivant : (régime de transition).

10^{-3} N	130	140	150	160	170	180	190	200
a	16,5	16,8	17,2	17,7	18,3	18,8	19,2	19,4

« Du reste, ajoutent Hesselberg et Birkeland, nous avons été « frappés par le fait qu'un même ballon ne montait pas toujours « avec la même vitesse dans le régime de transition ; les varia- « tions de vitesse étaient trop grandes pour pouvoir être attri-

(1) Hesselberg et Birkeland, Ueber die Steigegeschwindigkeit der Pilotballone. Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie, 1917 page 313.

« buées à des erreurs d'expérience. Nous pouvons donc admettre « que dans le régime de transition, un ballon peut, sous des con- « ditions apparemment identiques, monter avec des vitesses dif- « férentes. »

Ainsi Hesselberg et Birkeland donnent raison à Wenger en montrant qu'il existe des coefficients variables avec N et qu'il existe un régime transitoire dans lequel a varie fort probablement avec le degré d'agitation atmosphérique... Toutefois, contrairement à l'opinion de Wenger, le capuchon ou le filet, dont on peut munir le ballon, n'a aucune influence. Par contre, d'accord avec Dines, le lest augmente la vitesse ascensionnelle.

Enfin Birkeland et Hesselberg, montrent qu'à l'air libre, la valeur de a doit être prise dans le régime transitoire, mais plus grande qu'elle ne serait dans l'air calme toutes autres choses égales d'ailleurs.

Il est donc impossible de nier les effets de l'agitation atmosphérique sur la vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes. Voyons si toutes les variations de vitesse, ainsi que le prétend R. Wenger, peuvent s'expliquer par le seul fait de ce trouble tourbillonnaire.

A ce sujet nous résumerons un travail tout nouveau de Fr. Bingel (1).

Bingel, dans l'espoir de retrouver les effets de l'agitation atmosphérique dans l'ascension comme dans la descente, fait des recherches par triangulation avec deux ballons, l'un montant l'autre descendant. De ses expériences récentes (1918-1919) à Lindenberg, il résulte que le trouble tourbillonnaire ne peut pas expliquer les anomalies dans les vitesses ascensionnelles des ballons-pilotes.

Si, en effet, on examine les vitesses des deux ballons dans les différentes couches, aux différentes altitudes, on s'aperçoit que non seulement les vitesses diffèrent de celles qu'on a préalablement calculées, mais que les vitesses ascendantes diffèrent notablement des vitesses descendantes dans les différentes couches. Ainsi l'agitation seule ne peut expliquer les variations puisque son effet aurait dû être le même dans chaque couche. Il faut donc invoquer d'autres influences.

Bingel distingue alors les effets :

(1) Fr. Bingel. Turbulenz und Werticalstrome in der fr.... Atm..... Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie, 1921, Heft VII et VIII.

1° de l'agitation tourbillonnaire (Wenger) ;

2° des courants ascendants et descendants, des grands tourbillons.

Il se résume ainsi :

1° L'écart à la vitesse normale ascensionnelle d'un ballon, dans une même colonne d'air libre, est sujette à de fortes variations temporaires.

2° La vitesse normale ascensionnelle d'un ballon est modifiée et par l'agitation et par des courants verticaux.

3° L'agitation de l'atmosphère libre, qui diminue la résistance, consiste en un mouvement désordonné des particules d'air. Les courants verticaux qui agissent sur les pilotes sont, d'une part de grands courants ascendants ou descendants (courants convectifs), d'autre part de grands tourbillons possibles.

4° Le mouvement désordonné (agitation) diminue en général quand la vitesse du vent atteint 7 mètres par seconde et disparaît pour une vitesse de 10 mètres-sec., pour être remplacé ensuite par l'effet des grands courants. Il y a une transition continue entre la prépondérance de l'agitation et celle des grands courants.

5° Pour toutes les vitesses du vent que nous avons examinées de fortes rotations subites du vent en altitude provoquent ou agrandissent l'agitation. Ce phénomène est accentué quand en même temps le vent décroît en altitude, si le vent augmente en altitude l'agitation tourbillonnaire est annulée ou amoindrie.

Il résulte de tout ce qui précède qu'on ne peut pas nier l'existence et les effets des courants verticaux. Tous les météorologistes admettent que le vent a non seulement une composante horizontale mais une *composante verticale* et à la fin du XIX^e^ siècle on a essayé d'évaluer cette dernière par des moulinets spéciaux ou *clinoanémomètres* (1). Un travail récent à ce sujet est dû à M. C.-E. Brazier (2). C'est à cette composante verticale que M. P. Idrac attribue la possibilité *du vol à voile* des oiseaux (vol sans battements d'aile) (3).

(1) M. Dechevrens. *Bulletin de la Société météorologique*, février-mars 1895. Le Clinoanémomètre.

(2) Sur la mesure de la composante verticale du vent à l'aide de moulinets anéométriques. Note de C. E. Brazier. Comptes-rendus II, 1920, p. 1.227.

(3) P. Idrac. Thèse de doctorat 1921 ou l'Aérophile, 1-15 mars 1921.

P. Idrac indique aussi deux procédés nouveaux pour la mesure de la composante verticale du vent : l'un par ballon-sonde, l'autre par cerfs-volants porteurs de banderoles que les courants verticaux tiennent plus ou moins inclinées.

De plus tout nous incite à penser que l'atmosphère, comme l'océan, est le siège d'une véritable houle aérienne, houle complexe donnant lieu à des vagues et à des tourbillons.

On voit donc que si l'agitation tourbillonnaire modifie la vitesse ascensionnelle d'un ballon-pilote, les courants verticaux atmosphériques peuvent la troubler encore plus.

Ainsi toute formule théorique fixant cette vitesse ne traduit aucune réalité, et comme le dit M. F. La Porte (1), « il est nécessaire « pour des expériences de précision, comme celles qui servent « pour l'établissement de tables de tir, de ne pas se fier à des for- « mules a priori et de ne pas se contenter des observations d'un « seul poste. Il vaut alors mieux déterminer les vitesses ascension- « nelles par les visées d'au moins 2 postes jusqu'à l'altitude de « 1.500 à 2.000 mètres. » Une sérieuse statistique faite à la R. G. A. montre cependant qu'au dessus de 1.000 mètres l'erreur sur la vitesse ascensionnelle ne dépasse pas 1 m. pour des vents de 5 à 10 mètres, elle ne dépasse pas $1^{m},50$, pour des vents de 10 à 15 m. et n'atteint pas 2 m. pour des vents de 15 à 25 mètres. Pour la couche 0-1000 m., sur 168 expériences, l'erreur a été inférieure à $\frac{1}{5}$, 154 fois. On comprend ainsi pourquoi, dès 1917, l'artillerie de campagne, qui utilisait des flèches inférieures à 500 mètres, accorda un grand crédit aux sondages aérologiques par visées à un seul théodolite.

Admettons une légère erreur dans le calcul de la vitesse du vent par de pareils sondages, elle est indéniable. Il est cependant une donnée qu'on peut moins suspecter dans une opération saine, c'est celle de la direction du vent aux différentes altitudes (2). Or dans le travail que nous proposons d'exposer dans la suite, les di-

(1) Sondages de l'atmosphère à Gâvre au moyen de ballons libres en caoutchouc, Note de M. F. La Porte. C. R. I. 1920 p. 279,

(2) J. Rouch. La vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes. *Bulletin officiel des recherches scientifiques et industrielles.* N° 17, p. 180.

Afin de nous rendre compte des erreurs réellement commises dans la pratique nous avons comparé les directions et les vitesses du vent calculées à la fois au moyen de sondages à deux théodolites et au moyen de sondages à un

rections du vent joueront un rôle prépondérant. C'est, en effet, de l'examen de ces directions aux différentes altitudes que nous voulons tirer une *Contribution à la Prévision du temps.*

Rappelons tout d'abord quelques recherches antérieures faites à ce sujet.

seul théodolite en admettant la constance de la vitesse ascensionnelle du ballon. Nous n'avons jamais trouvé de différence supérieure à 20° sur la direction.

CHAPITRE V

Les ballons-pilotes et la prévision du temps

On a vu que les données des ballons-sondes ne pouvaient guère améliorer la prévision. Les ballons-pilotes permettant des sondages plus rapides et moins coûteux devaient contribuer à cette amélioration.

Dès le début du XIXe siècle de petits ballons remplis de gaz sont employés à l'étude des courants supérieurs de l'atmosphère. On trouve en effet dans le philosophical Magazine, V. 51, 1817, page 9, l'insertion suivante : (1) « M. Forster a observé de petits ballons « qui ont été faits et lancés par son frère et a trouvé que les cou- « rants supérieurs de l'atmosphère indiqués par les ballons étaient « ensuite observés à la surface de la terre. Ainsi en octobre 1809 « un ballon de 3 pieds 7 inches fut emporté en premier lieu par « un vent d'est, puis à la hauteur de 500 pieds à peu près il pénétra « dans un courant de N. N. W. et enfin, à une altitude plus élevée, « dans un courant de S. W. Les changements successifs des vents « au sol furent E. — N.N.W., — S.W. J'ai des documents de 9 expé- « riences différentes pendant 1810 et 1811 dans lesquelles chaque « ballon traversera trois courants différents dont les directions « furent successivement trouvées au sol 36 heures plus tard. »

Toutefois l'aérologie, comme on le sait, ne devait se développer que bien plus tard.

A la 6e réunion de la Commission internationale pour l'aérostation scientifique (Monaco 1909) M. V. Bjerknes exprime le désir qu'on

(1) Cette insertion est réimprimée dans l'Observatory, vol. 44, 1921, 347 348. Elle est mentionnée dans Quarterly Journal of the royal Meteorologica. society, vol. 48, juillet 1922.

fasse des sondages aérologiques aussi complets que possible et en nombre suffisant pour servir de base aux cartes du mouvement de l'air, cartes établies pour différentes altitudes et devant améliorer la prévision (1).

Exner étudiant les variations de la direction des vents avec l'altitude propose, en 1910 (2), la loi suivante : « Une rotation des vents vers la gauche, à mesure qu'on s'élève, annonce une hausse du baromètre, une rotation vers la droite présage une baisse. » Toutefois M. Peppler a pu montrer plus tard que cette loi n'était pas toujours vérifiée.

En 1912 (3), L. Matteuzi présente un travail de Fabris résumant des observations sur des lancers de ballons-pilotes, de juin 1910 à mai 1911, à la station de Vigna di Valle ; ce travail contient quelques aperçus nouveaux sur les directions des vents en altitude et sur la variation de leur vitesse. R. Assmann (4) expose un travail de W. Peppler à Lindenberg ; nous y trouvons la loi suivante : *Le baromètre baisse si le transport de l'air aux grandes altitudes se fait vers les hautes pressions, il monte s'il se fait dans la direction des basses pressions.*

Les ballons-pilotes avaient été exploités rapidement en Angleterre. En 1907-1908-1909, J. P. Cave procède à de nombreux sondages à un ou deux théodolites et en 1912 il publie The structure of the atmosphere in clear weather ? Cette publication établit qu'il y a une concordance suffisante entre les graphiques obtenus par simple ou par double visée et qu'on peut ranger les formes de graphiques en un certain nombre de classes. Cette classification est basée sur les changements de vitesse et les changements de direction avec la hauteur. Pour Cave la direction générale importe peu :

Classe a. — Les vents de la classe *a* sont caractérisés par un faible changement de direction et de vitesse.

Classe b. — Les vitesses de ces vents croissent fortement avec l'altitude. On trouve de pareils vents quand le centre dépression-

(1) Quelques-unes de ces cartes sont contenues dans Dynamic Meteorology and Hydrography, Part I., by V Bjerknes and J. W. Sandstrom.

(2) Meteorol, Zeitschr, 1910, Heft 8.

(3) 7e réunion de la Commission internationale pour l'aérostation scientifique, Vienne, 1912.

(4) Même réunion.

naire est au Nord ou à l'Ouest de la station. Ils existent également au N. E. d'un anticyclone avec une dépression lointaine dans le N. W. Ces vents sont alors du Nord. On les trouve encore sur le côté ouest d'un anticyclone avec une dépression lointaine dans le N.-Ouest ; les vents sont alors du Sud.

Classe c. — Les vents de cette classe faiblissent avec l'altitude. Ce sont des vents généralement d'*est* qui se maintiennent jusqu'à grande hauteur.

Classe e. — Les vents sont caractérisés par des renversements ou de grands changements de direction avec l'altitude.

Classe f. — Les vents supérieurs soufflant de l'ouest, du centre d'une basse pression ; les vents inférieurs subissent de fréquents renversements.

En réalité on retrouve bien dans les sondages les formes énoncées ci-dessus ; mais une classification n'a aucun intérêt si elle n'est pas suivie de règles pratiques pouvant servir à la prévision. Peu m'importent les renversements des vents si l'on ne me laisse pas entrevoir comment ils modifieront l'allure du baromètre et la situation atmosphérique.

M. Rouch (1) confond les deux dernières classes en une classe unique : *La direction du vent change considérablement au cours du sondage.* De tels vents, dit-il, s'observent surtout quand le vent de surface souffle de l'*est*. On les trouve aussi souvent quand une dépression éloignée, à l'ouest ou au N.-W., se rapproche de la station. Dans ce cas le vent de surface vient du sud-est et les vents supérieurs de l'W. ou du N.-W. Les vents de cette classe sont souvent associés en été à des situations orageuses.

Nous reviendrons plus loin sur de pareils changements de direction pour montrer qu'ils ne sont pas toujours de mauvais précurseurs.

MM. Dunoyer et Reboul (2) utilisent les vents donnés par les sondages pour la prévision des variations barométriques.

1° Lorsque des sondages successifs donnent des vents forts en haut ou des vents dont l'intensité est progressivement croissante, prévoir la baisse.

(1) Rouch. *Manuel pratique de météorologie.*
(2) Dunoyer et Reboul. *C. R.* 1919, I. 785.

2° Lorsque des sondages successifs donnent des vents faibles en haut ou des vents dont l'intensité est progressivement décroissante, prévoir la hausse.

3° Lorsque des vents de sondage sont homogènes et n'ont point varié depuis plusieurs heures, prévoir l'immobilité barométrique.

On considère comme vents homogènes des vents qui ne varient que de 2 à 3 m. par 100 m. d'altitude.

D'un autre côté M. Baldit (1) examine les cas particuliers de décroissance des vents avec la hauteur, et considère 3 groupes de vents caractéristiques :

1er groupe : *Vents d'entre N. et E.* — C'est le groupe le plus important. Généralement le vent passe par un maximum vers 600 m., diminue jusque vers 1.600 m., puis augmente de nouveau plus ou moins régulièrement ; la direction tourne de l'E vers le N., s'est-à-dire en sens inverse de la rotation habituelle. Ces vents correspondent à un anticyclone allongé dont l'axe orienté du S. W. au N. E. traverse la Manche, la Mer du Nord et la Scandinavie. Des pressions plus basses existent symétriquement de part et d'autre. Cette situation est parfois persistante et marque un régime de beau temps. Les régions où l'on observe cette diminution de vitesse sont situées sur le versant S. E. de l'anticyclone.

2e groupe : *Vents d'entre E. et S.* — La vitesse du vent diminue régulièrement avec la hauteur à partir de 1.000 m., la direction étant à toutes les altitudes voisine de E. S. E. sans rotation marquée dans un sens ou dans l'autre.

Ces vents correspondent à un anticyclone dirigé du N. W. au S. E. et traversant la Mer du Nord et l'Europe centrale. En même temps une aire de basses pressions existe au S. W de l'Europe, vers le Golfe de Gascogne ou l'Espagne. La région dans laquelle a lieu la diminution de vitesse est située sur le versant S. W. de l'anticyclone où la température au sol est moins élevée que dans le domaine des basses pressions adjacent. Ce groupe paraît lié à des manifestations orageuses sur le S. W. de l'Europe.

3me groupe : Vents d'entre E. et S. à 300m puis d'entre S. et W. — La diminution de vitesse a lieu jusqu'à 4000 m. après une augmentation de 0 à 1000 m. La rotation des vents a lieu dans le sens positif c'est-à-dire dans le sens ordinaire de la rotation des vents avec la

(1) Baldit. *C. R.* 1919, I. 1211.

hauteur. Ce groupe s'observe au moment où un anticyclone, établi depuis plusieurs jours sur nos régions, se déplace vers l'E. suivi d'une baisse barométrique parfois importante. Ce groupe est aussi utile pour la prévision du temps.

Enfin un travail de R. Wenger (1) montre que des situations isobariques identiques donnent des sondages identiques même pour des régions aussi différentes que Strasbourg et Ténériffe.

(1) R. Wenger. Beit. z. Phys. d. fr. Atm. Tome III, 173 à 205.

CHAPITRE VI

Observations personnelles sur les sondages aérologiques

C'est au mois de novembre 1916 que j'ai été attaché au Service météorologique aux Armées et tous les sondages que j'ai examinés (plus de 3.000) ont été effectués pour les besoins de la IIIme armée. Au cours de l'été 1921 il m'a été possible de reprendre des sondages à l'Institut de physique du Globe de Strasbourg. Laissant de côté l'examen de courbes isolées, je me suis surtout attaché à suivre les modifications des courbes avec le temps, avec l'allure du baromètre et celle des cartes isobariques.

Mes observations m'ont conduit à classer les sondages de la façon suivante :

1° *Sondages à direction constante* : ce sont ceux dans lesquels les vents inférieurs et supérieurs conservent sensiblement la même direction ;

2° *Sondages à angle brusque* : Les vents supérieurs prennent subitement des directions, généralement des régions ouest, contraires à celles des vents inférieurs ;

3° *Sondages tournants* : ce sont ceux dans lesquels les vents changent progressivement de direction avec l'altitude. Par exemple les vents inférieurs étant des régions *Est* ou *Sud-Est* les vents supérieurs deviennent *Sud*, *Sud-Ouest* et *Ouest* avec l'altitude ;

4° Sondages dans lesquels les vents de la couche 0-2000 m. changent rapidement de direction avec le temps et sont de directions trop différentes pour des stations voisines.

5° Sondages indiquant des vents faibles et variables en direction jusqu'à grande altitude.

Les sondages à angle brusque ont tout d'abord attiré mon atten-

tion. Nous savons que les vents inférieurs convergent vers le centre des dépressions et qu'ils s'élèvent ensuite pour diverger avec les couches supérieures (1). On peut donc concevoir que des masses d'air peu denses après leur grande dilatation s'écoulent au loin et *sans mélange* au-dessus de couches plus denses formant une zone de hautes pressions. D'autre part, d'après Exner (2) qui étudie *la progression* des vagues de froid ou de chaleur, nous voyons qu'il faut admettre l'existence possible de deux couches d'air nettement distinctes avec des directions opposées, le gradient isobarique changeant de sens. (*fig. 7*).

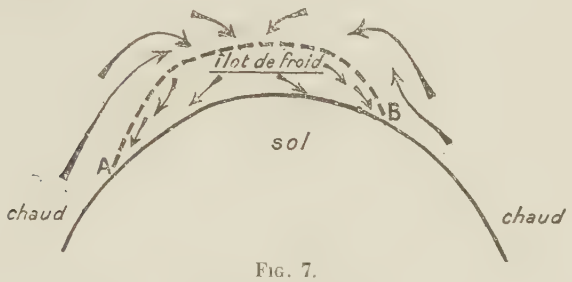


FIG. 7.

Un sondage pratiqué non loin de A ou de B, par exemple donnera donc deux directions opposées et fortement angulaires. (3) En bas des vents anticycloniques emporteront le ballon jusqu'à ce que celui-ci ait rencontré les vents divergents qui le dirigeront dans un sens opposé. En projection horizontale un pareil sondage se traduit par un tracé à angle brusque (*fig. 8*). La couche supérieure se trouvant à des altitudes de plus en plus faibles on se rapproche de plus en plus des points A et B où on trouve au sol la région des vents cycloniques.

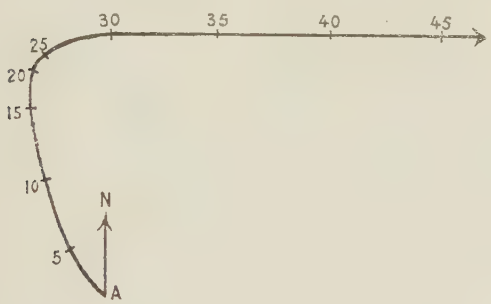


FIG. 8.

(1) CAVE, The structure of the atmosphere in clar Weather, p. 75. — ROUCH, *Manuel pratique de météorologie.*

(2) EXNER, *Dynamische meteorologie*, p. 248.

(3) Les chiffres indiquent les hauteurs en hectomètres.

Mais, comme l'a montré Margulès (1), les tempêtes naissent principalement d'une chute d'air froid et d'une ascension d'air chaud et ce phénomène peut se produire dans deux cas différents : les masses chaudes et froides peuvent se trouver superposées ou juxtaposées. Nous venons de les supposer l'une sur l'autre dans un état d'équilibre. Margulès ajoute : cet équilibre peut être stable ou instable ; le moindre mouvement vertical peut amener la pénétration réciproque et le bouleversement des masses. Le passage de l'équilibre stable à l'équilibre instable se produit pour un gradient de 1° de 1° par 100 mètres. C'est ce que j'ai indiqué moi-même dans l'étude des sondages par l'avion météorologique (2). Or un accroissement de gradient *thermique* peut se produire par échauffement de la couche atmosphérique inférieure ou par refroidissement de la couche supérieure. Le premier cas est occasionné par le rayonnement solaire intense (cas des éclaircies qui précèdent les dépressions, comme je l'indiquerai plus loin). Le rafraîchissement des couches supérieures peut se produire dans les circonstances favorables au rayonnement de l'atmosphère dans l'espace.

Mais le contact des masses chaudes et froides peut être latéral par le fait de situations géographiques particulières. *(fig. 9)*.

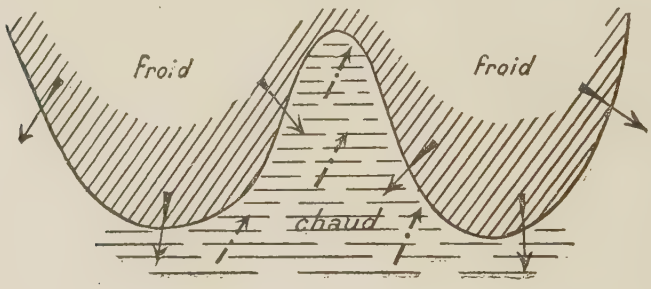


Fig. 9.

Que l'on admette la pénétration de la couche supérieure dans la couche inférieure, c'est-à-dire le conflit des vents superposés, ou celui des vents latéraux, il est facile de voir qu'au voisinage de ce contact, *les sondages sont tournants*. En bas le ballon est entraîné

(1) Exner, Dyn. meteor. p. 246.
(2) Voir sondages par avion.

par les vents anticycloniques, en haut il est emporté par les vents venant des régions plus chaudes. Mais comme l'équilibre est instable il y a pénétratiou mutuelle de ces deux couches et le ballon décrit alors une courbe caractéristique de cette instabilité *(fig. 10)* et d'un état particulier de l'atmosphère favorable à la production des grains et des orages en été et de la neige en hiver.

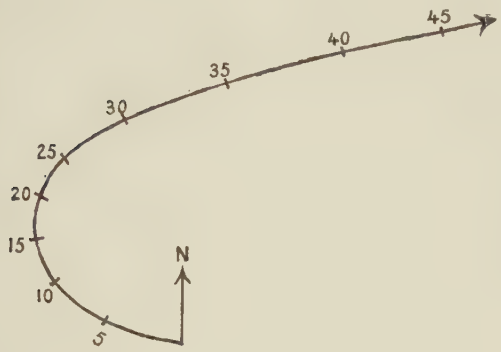


FIG. 10.

D'une note récente de M. R. Dongier à l'Académie des Sciences (1) j'extrais les lignes suivantes : « Des observations faites à la tour Eiffel dans des « situations orageuses mettent en relief l'existence de deux cou- « rants superposés possédant des températures et des directions « différentes. Le courant supérieur est chaud et il est animé d'une « vitesse plus grande que celle du courant inférieur de tempéra- « ture plus basse. Ces masses ne se mélangent pas notablement « mais les frottements qu'elles exercent l'une sur l'autre provoquent « des vagues qui immergent les instruments placés au sommet de « la tour tantôt dans la masse froide du courant inférieur, tantôt « dans la masse chaude du courant supérieur La conclusion à « laquelle vient de nous conduire la discussion de faits bien éta- « blis, à savoir l'existence d'un courant d'air chaud mis en mou- « vement au-dessus des couches froides par le jeu naturel des « forces qui interviennent dans une dépression s'accorde avec les « vues nouvelles que le professeur Bjerknes de Bergen a émises « dans ces dernières années sur la structure des cyclones en mou- « vement. Les instruments de la tour Eifel sont donc susceptibles

(1) R. DONGIER. Les oscillations simultanées de la température et du vent au sommet de la tour Eiffel (*C. R. Acad. des Sc. 1921*, II, page 699).

« de marquer la surface directrice qui sur le front d'un cyclone « en mouvement marque la limite du secteur chaud »

Mais les sondages aérologiques permettent mieux encore d'annoncer l'approche des cyclones. Un sondage nettement angulaire montre l'existence de deux couches d'air superposées, de directions différentes et dans un état stable ; il donne en plus l'épaisseur de la couche relativement froide d'où l'on peut déduire la distance approximative de la surface directrice. Un sondage tournant indique que deux couches d'air superposées et de directions différentes sont dans un état instable, elles se pénètrent mutuellement par le fait d'un gradient adiabatique élevé.

Que ces idées soient justes ou non, ce sont celles que j'ai utilisées avec profit pendant la guerre.

Pour mettre un certain ordre dans mes observations j'étudierai les différents sondages que j'ai effectués en me situant sur les différents points d'une carte isobarique. J'induirai de cette étude quelques règles pouvant servir à la prévision du temps.

Position d'un lieu sur une carte isobarique. — Puisque les hautes et les basses pressions se meuvent sur les continents, un lieu donné peut être dans des situations nombreuses et différentes. En particulier il peut être :

1° Au centre d'un vaste plateau anticyclonique.

2° Sur la périphérie de ce même plateau.

3° Il peut être menacé par une dépression ;
a) cette dépression n'est pas à craindre ;
b) cette dépression est à redouter.

4° Le lieu est menacé par des grains et des orages en été, par de la neige en hiver.

5° Le régime dépressionnaire est établi.

6° L'anticyclone revient. Indices d'une nouvelle dépression.

7° Le lieu est frappé par une dépression secondaire.

Etude de quelques cas spéciaux particulièrement nets. — § 1. — *Le lieu est situé sur un vaste plateau anticyclonique* :

Caractères : a) *Baromètre très haut, vers 770.*

b) *Sondages très irréguliers en plein jour.*

c) *Vents inférieurs et supérieurs très faibles ou faibles jusqu'à grande hauteur.*

Ces caractères sont évidents dans les sondages du : 25 mai 1917, 10-11 septembre 1917, 22 septembre 1917, 20 octobre 1917.

Ces changements de direction surprenants que l'on constate dans les vents des zones anticycloniques ne peuvent s'expliquer aisément. Sur ces zones l'air doit être descendant ; mais il obéit dans sa chute lente aux différents gradients barométriques en hauteur. Dans ce cas les isobares en altitude doivent être de formes très variées et très variables ; cela résulte du fait que sur des verticales différentes les gradients thermiques varient en raison des rayonnements particuliers dus aux surfaces et aux conformations du sol. La preuve en est dans la formation de ces cumulus dits de beau temps. Ils naissent en certains points, pour disparaître ou se modifier un peu plus loin, au dessus d'un autre point, sans jamais atteindre les proportions du cumulus orageux.

Etant données les faibles vitesses des vents que l'on trouve au-dessus de ces hauts plateaux on comprend pourquoi ils ont été désignés sous le nom *d'îlot des calmes*. Cette appellation n'est évidemment justifiée que sur leur centre même où l'on observe un temps magnifique et parfois très durable.

§ II. — *Le lieu est sur la périphérie d'un plateau anticyclonique* :

Caractères : a) *Baromètre assez haut (vers 765).*

b) *Sondages dirigés ou rectilignes.*

c) *Vents modérés ou assez forts.*

De nombreux sondages montrent *par baromètre assez haut*, des vents modérés ou assez forts et de *direction constante aux différentes altitudes*. On est alors sur la périphérie d'une zone de hautes pressions ; le gradient barométrique y est assez élevé... La direction des vents dépend évidemment du point périphérique occupé. Un anticyclone peut donner jusqu'à grande hauteur des vents W.N.W.

N. N.N.E. E. S.E. et jusqu'au sud. Un anticyclone sis sur l'Atlantique occasionne des vents des régions ouest ; celui qui a son centre sur l'Angleterre donne naissance à des vents N. et N.E. Des vents d'E. ou S.E. par baromètre haut proviennent d'un anticyclone sis sur l'Europe centrale et orientale. Le 30 janvier 1918, les Gothas ont bombardé Paris par des vents anticycloniques de l'E. ou S.E. Le 22 février 1918 le baromètre marquait 772 par vents nettement ouest.

Il est aisé de comprendre que la *nébulosité* est toute entière sous la dépendance de la direction et de la vitesse des vents. Des vents, venus de l'Océan nous donnent des ciels couverts, des vents N., N.E. E. S.E. plus continentaux nous vaudront des temps superbes ou au moins de vastes éclaircies. Quelles que soient les directions constantes des vents, par baromètre assez haut, il me sera toujours possible de prévoir la situation isobarique prochaine. Je serai en garde, ainsi que je le montrerai plus loin, contre des vents supérieurs croissant anormalement en force.

§ III. — *L'approche des basses pressions est signalée* ;

Caractères : a) *Baromètre haut.*

b) *Sondage à angle brusque.*

Nous sommes au centre d'un vaste plateau anticyclonique, les vents sont faibles et indécis ; le baromètre reste haut. Mais à grande altitude (4000-5000 mètres), le sondage révèle des vents de N.W. à S.W. on obtient l'*angle brusque*. Les basses pressions ne sont pas éloignées. De pareils sondages se rencontrent fréquemment : 30 avril, 9 mai, 22 mai, 17 juin, 6 juillet, 12 juillet, 24 juillet, 4 septembre, 11 septembre, 24 septembre, 1er octobre, 21 octobre etc... (année 1917).

En examinant simultanément les cartes isobariques quotidiennes et les sondages des jours correspondants, il est facile de constater qu'une dépression est aussi rapidement annoncée par les sondages et ceux-ci, périodiquement répétés, donnent les meilleures indications sur la stabilité des courants atmosphériques.

§ III (*bis*). — *Annonce de basses pressions par vents anticycloniques des régions ouest.*

Caractères : a) *Baromètre haut*

b) *Vents inférieurs et supérieurs des régions ouest. Vents supérieurs croissant anormalement en force avec l'altitude et s'infléchissant vers le sud-ouest.*

Admettons qu'un vaste anticyclone établi sur l'Océan donne aux isobares l'allure indiquée par la carte ci-contre. Un sondage pratiqué sur le nord de la France, révèle des vents des régions ouest. Si maintenant une dépression venue d'Islande ou du haut Atlantique descend sur l'Europe, on peut observer que les vents dépressionnaires et les vents anticycloniques sont concordants. *Les vents croissent alors en force avec l'altitude* malgré un baromètre légèrement haut. L'anticyclone se comprime, les isobares prennent une allure particulière que l'on qualifie d'isobares *en coin*.

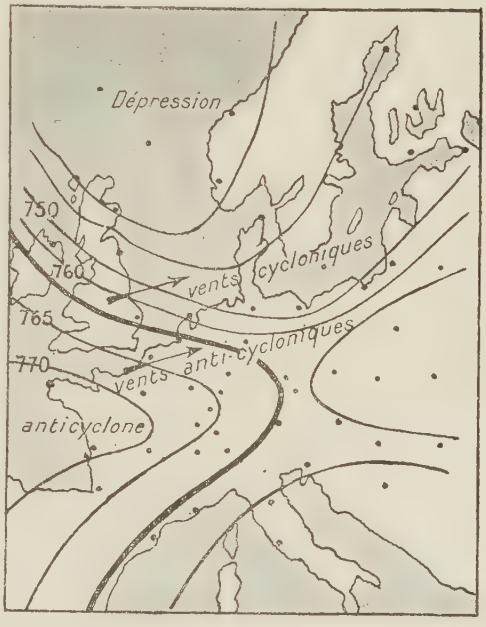


Fig. 11.

Les vents résultants acquièrent alors une force exceptionnelle et comme ils peuvent avoir momentanément une valeur anormale, il se produit **des coups de vent** fort dangereux pour l'aviation et l'aérostation. Ces coups de vent sont suivis d'averses et de grésil. Au ciel quelques éclaircies. Toutefois si les vents inférieurs acquièrent une force persistante la dépression glissera sur la Baltique ou se

comblera (1). Si au contraire leur vitesse ne dépasse pas 5 à 6 mètres la dépression envahira la France.

25 novembre 1917, 25 décembre 1917, 14 janvier 1918, 27 février 1918, 23 mai 1918, 14 juin 1918, 18 juin 1918, 26 juillet 1918, 9-17-18-19-31 août 1918.

§ IV. — *La dépression signalée par l'angle brusque n'est pas à craindre :*

Caractères : a) *Baromètre haut.*

b) *Les sondages révèlent l'angle brusque à des altitudes de plus en plus élevées. (fig. 12)*

Revenons sur le plateau anticyclonique. Une dépression nous est signalée par un sondage à angle brusque. Mais les sondages

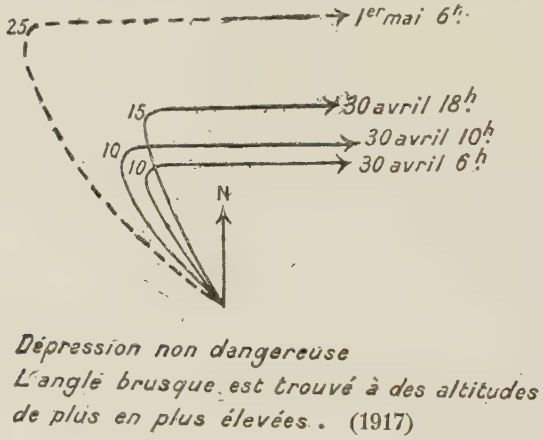


Fig. 12

ultérieurs révèlent cet angle à des altitudes de plus en plus élevées. Nous restons toujours loin du conflit des vents inférieurs et supérieurs, le baromètre est stationnaire, la dépression n'est pas à craindre (30 avril, 1er mai, 1er juin 1917).

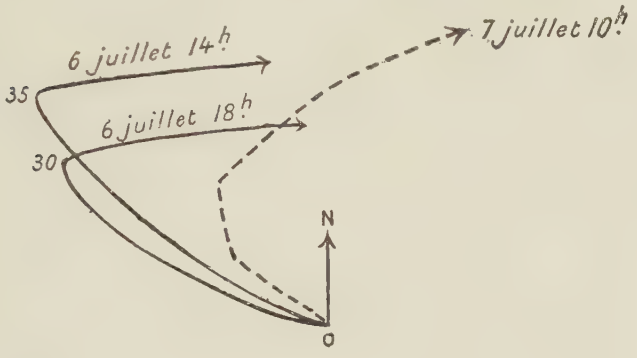
(1) Conformément aux lois de Guilbert.

§ IV (*bis*). — *La dépression signalée par angle brusque s'avance* :

Caractères : a) *Baromètre légèrement en baisse.*

b) *L'angle brusque est trouvé à des altitudes de plus en plus basses.*

De tels caractères (*fig. 13*) révèlent que la couche d'air anticyclonique s'amincit, on se rapproche donc de la zone de contact des deux couches. Il y a lieu d'affirmer ici que l'observation des



Dépression dangereuse trouvée le 6 juillet 1917. Le sondage du 7 juillet à 10h est un précurseur d'orage. — L'orage éclate dans la nuit du 7 au 8 juillet. (1917)

FIG. 13

nuages, de leur direction et de leur vitesse n'est pas une méthode suffisante pour la prévision. Des nuages bas masquent complètement ce qui se passe au-dessus d'eux. D'autre part, de superbes éclaircies (éclaircies dépressionnaires) précèdent parfois l'arrivée des dépressions ; le ciel peut être d'une limpidité parfaite, les cirrus même font quelquefois défaut. Et cependant les sondages possibles alors jusqu'à grande altitude, montrent des indices certains de mauvais temps prochain. *Ces vastes éclaircies sur lesquelles des météorologistes, peu confiants dans les sondages, ont appuyé leur prévision à courte échéance, annonçant des nuits claires et des ciels purs, nous ont occasionné des désastres dans des raids aériens. Je ne veux citer, pour mémoire que la nuit du 16 au 17 septembre 1918 dans laquelle des es-*

cadrilles se sont laissées malheureusement surprendre par un grain orageux très violent.

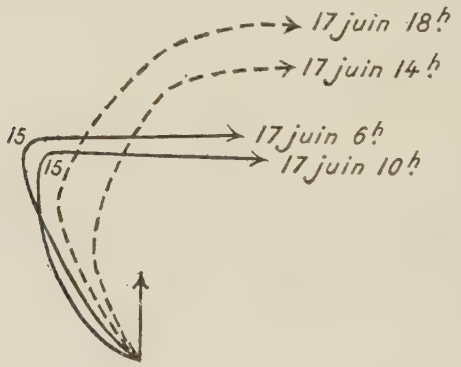
§ V. — *Le lieu est menacé par des orages et des grains en été, par de la neige en hiver :*

Caractères : a) *Le sondage devient tournant,*

b) *Le baromètre va baisser rapidement.*

Le plus mauvais tournant est celui de l'E. ou S.E au S.W. ou W. par le sud.

Chaque fois, qu'en été, on constatera un pareil tournant (*fig. 14 et 15*) avec *vents supérieurs croissant en force*, une température



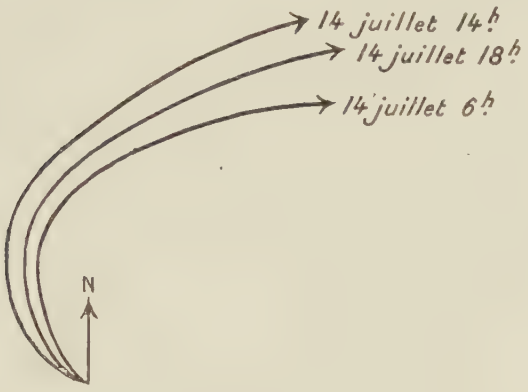
Sondages à angle brusque se modifiant en sondages tournants. — L'orage éclate dans la nuit du 17 au 18 juin. (1917)

Fig. 14

diurne au sol de 18° environ, on peut attendre un orage ou un grain orageux sur le lieu du sondage ou dans le voisinage. *L'orage n'est pas imminent si les vents au sol restent faibles ou très faibles ; il est à redouter à brève échéance, s'ils atteignent une vitesse de 5 mètres.*

De pareils tournants sont dus à une dépression venant de l'Atlantique par le Golfe de Gascogne, ou à une dépression venue d'Is-

lande, mais poussant une pointe vers ce même golfe. (1) On a alors une dépression à ruban de grain. Les hautes pressions sises sur l'Europe Centrale sont refoulées vers l'*est*. Ces mêmes tournants se rencontrent aussi à l'arrivée d'une dépression secondaire, mais



Sondages tournants précurseurs de violents orages.
Baromètre en baisse rapide.
Violents orages sur la France et particulièrement sur le front anglais. (1917)

FIG. 15

dans ce cas ils sont moins persistants, les vents inférieurs variant plus rapidement.

A titre d'exemple je veux citer les faits suivants que j'ai observés au poste de sondage d'Artemps, près de Saint-Quentin.

10 mai 1917. — *Rotation de 10 à 28* **par le sud** (2) (*aperçue à 6 h. et précédée d'un sondage à angle brusque.*

Cette rotation avait été constatée dans presque toutes les stations

(1) Voir *La Loi des grains*, par M. E. DURAND-GRÉVILLE, Congrès International de météorologie. Paris 1900.

(2) Les directions des vents sont toujours notés de 0 à 40.

0.40 Nord
10 Est
20 Sud
30 Ouest

d'armée le 9 mai au soir et voici ce que j'ai pu relever pour le 10 mai : 15 h. 15 Satory, **orage**.
16 h. 25 Dugny, —
16 h. 30 Chartres, —
17 h. 30 Noyon, —
20 h. 30 Châlons, —
1 h. 10 Malzéville, —

12-13 mai 1917. — *Rotation de 10 à 25 par le sud (vue le 12 à 6 h.).*

12 mai : 13 h. Artemps, grain orageux.
15 h. — orage.
13 mai : 6 h. Chartres, orage violent.
7 h. 45 Crugny, —
8 h. 45 Rosnay, —
10 h. 55 Caen, orage.
11 h. 10 Satory, —
11 h. 30 Dugny, —
14 mai : 2 h. 35 Dugny, —
3 h. 12 Noyon, —
3 h. 45 Berzy, —

4 juin 1917. — *Rotation de 14 à 24 par le sud (aperçue à 6 heures, elle persiste les 5 et 6 juin).*

5 juin : 17 h. 40 Langres, orage.
17 h. 30 Malzéville, —
10 h. Nevers, —
19 h. 18 Tours, —
Nuit du 5 au 6 Noyon, —
Dugny, —
Châlons, —
Crugny, —
Satory, —
Hesdin, —
6 juin Malzéville, —
Crugny, —
St-Pol-s.-M., —
Rosnay, —

Nuit du 6 au 7 St-Pol, orage.
Noyon, —
Rosnay, —
Dugny, —
7 juin Dugny, —
Noyon, —
Berzy, —
Souilly, —
Satory. —
Belfort, —
Malzéville, —

17 juin 1917. — *Rotation de 14 à 27 par le sud (aperçue le 16 à 18 h. 30).*

10 h. 45 Chartres, orage	15 h. Berzy (grêle)
12 h. 40 Dugny —	15 h. 40 Châlons grain.
13 h. 30 Dieppe, —	16 h. 30 Crugny orage.
14 h. 30 Noyon, grêle	16 h. 55 St-Pol s. M. orage.

19 juin. — *La rotation subsiste :*

Orages signalés le matin :	orages signalés la nuit.
Noyon	St-Pol-s-M.
Crugny	Noyon
Orages signalés le soir	Dugny
St-Pol-s-M.	Berzy
Châlons	Châlons
Souilly	Souilly
Hesdin	Belfort.

20 juin. — *La rotation subsiste :*

Noyon orage	Dugny orage
Boulogne s.-m. —	Belfort —
St-Pol-s.-m. —	

27 juin. — *Rotation de 15 à 26 par le sud (aperçue le 27 à 6 h. 30).*

14 h. 25 Noyon orage	orages de nuit : Dugny
15 h. 10 Berzy —	Berzy
15 h. 35 Noyon —	Satory
22 h. 30 Dijon —	Châlons.

28 juin. — *La rotation subsiste :*

6 h.	Noyon orage	19 h. 50 Crugny	orage
11 h. 30	Alençon —	20 h. 30 Chaumont	—
13 h.	Dugny —	Nuit du 28 au 29 St-Pol	—
15 h. 30	Poitiers —	Rosnay	—
16 h. 30	Chartres grêle	Berzy	—
17 h. 15	Etampes orage	Belfort	—
17 h. 30	Gien —	Satory	—
17 h. 45	Nevers —	Hesdin	—
19 h. 30	Noyon —	Crugny	—

14 juillet. — *Rotation du 14 à 30 par le sud (aperçue le 13 à 14 heures).*

7 h. 10	Flers	orage	Nuit du 14 au 15	
8 h. 10	Caen	—	Souilly	orage
11 h. 40	Boulogne	(grain)	Malzéville	—
12 h.	Dugny	—	Dijon	—
	Crugny	—	Belfort	—
	Hesdin	—		
	Satory	—		
	Dijon	—		
	Belfort	—		

Orages sur tout le front anglais.

De pareilles rotations avec les orages subséquents se produisent les 25 juillet, 8 août, 9 août, 12 août, 18 août, 26 août, 6 septembre 1917.

Je n'ai signalé les rotations qu'à partir du moment où elles ont paru nettes, mais, presque toujours, elles sont précédées de sondages à retour brusque. Ces retours se modifient peu à peu jusqu'à l'approche du tourbillon. L'orage éclate rapidement si le tournant se fait dans la couche 1500-3000 m. L'existence du conflit entre vents contraires à l'approche de l'orage justifie le dicton populaire : *l'orage marche contre le vent.*

A côté des orages, j'ai signalé les grains de même nature, moins les manifestations électriques. Le grain est aussi à craindre par sondages tournants, particulièrement à l'instant où les vents supérieurs se substituent brutalement aux vents inférieurs, produisant ainsi une rotation des vents au sol très dangereuse. On doit redouter, après un premier grain, le retour inverse des vents, celui-ci peut être suivi de nouveaux grains aussi dangereux. Il faut aussi se méfier de petits grains, par baromètre en hausse, alors qu'une dépression s'éloigne lentement et qu'un anticyclone, à vents contraires, se rétablit sur la région. Le tracé barométrique est alors saccadé jusqu'au moment où l'anticyclone a pris nettement position. Ces grains, conformes à la théorie de Bjerknes, ont été étudiés aussi par R. Dongier (1). Il me semble donc que, parmi les

(1) *C. R.* 1921 II p. 1334. R. Dongier : Les oscillations simultanées de pression et du vent au sommet de la Tour Eiffel et leur relation avec la surface de grain d'une dépression.

nombreuses sources attribuées à l'électricité atmosphérique, on pourrait insister davantage sur l'*origine dynamique. Il est très rare, en effet, de constater des orages par vents inférieurs et supérieurs de même direction, la composante* **Est** *pour les vents inférieurs paraît nécessaire.* On pourrait admettre que le frottement de couches d'air de directions différentes amène une *transformation d'énergie cinétique en énergie électrique* ou qu'il donne lieu à une ionisation particulière favorable à la formation du cumulus orageux.

On voit aussi combien les sondages seraient précieux sur les côtes ouest qui ne peuvent utiliser pour la prévision des observations plus occidentales. Le violent orage qui dans la nuit du 15 au 16 juillet 1918 endommagea gravement l'abri d'un dirigeable à Rochefort-sur-Mer, aurait pu être prévu par les sondages exécutés à Rochefort même le 15 juillet.

Altitude	1 heure		5 heures		12 heures	
	Direction	Vitesse	Direction	Vitesse	Direction	Vitesse
sol	18	2	18	2	8	3
200	24	7	24	5	10	5
400	22	7	23	8	11	7
800	30	13	31	7	18	13
1000	30	14	30	9	19	13
1500	30	16			20	14
2000					22	13

Tous ces sondages, et particulièrement celui de 12 heures, pouvaient faire prévoir à bref délai, un grain dangereux.

J'ai examiné pour les 5 mois, mai, juin. juillet, août, septembre 1917, combien de fois s'étaient présentés les sondages précurseurs d'orages et combien d'orages les avaient suivis dans les 3 stations : Noyon, Châlons, Malzéville.

STATIONS	Sondages conformes	Orages qui les suivent	Orages divers
Noyon	22	21	4
Châlons	25	15	3
Malzéville	24	18	2
	71	54	9

Pour les stations de Châlons et de Malzéville je n'ai pu faire entrer en ligne de compte que des orages signalés à la station centrale. Sans nul doute certains m'ont échappé. Quant aux orages divers ils proviennent tous de poches barométriques, de dépressions secondaires que je caractériserai plus loin.

L'été 1918 fut beaucoup moins troublé. Voici ce qu'on a pu constater à la station météorologique de la III[e] armée à Clermont (Oise) :

Sondages précurseurs d'orages : 12
Orages qui les suivent..... 11
Orages divers..... 3

On voit donc tout le crédit que semble mériter l'examen attentif des sondages et combien il peut être utile à la prévision comme à la navigation maritime et aérienne.

Au cours de l'été 1921, j'ai été mis à même de faire des sondages à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg. Certes les orages ont été peu nombreux en août et septembre. Toutefois voici le sondage du 10 août à 8 heures.

Altitude	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Direction	5	14	17	23	23	24	24	24	24
Vitesse	3	5	7	5	10	11	11	16	22

Les orages consécutifs ont éclaté sur Strasbourg à 15[h]30 et 16[h]30.

Le 29 août à 8 heures, j'avais le sondage suivant :

Altitude	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Direction	24	27	32	32	36	36	33	33	34
Vitesse	4	8	5	5	8	7	7	9	8

Le tournant caractéristique n'existait pas, à mon avis l'orage ne devait pas éclater. Vers midi le ciel se couvrant de cumulus menaçants, la prévision locale, faite par les moyens ordinaires, annonça l'orage. Il ne se produisit pas comme je l'avais bien pensé. Si le lendemain matin il y eut un coup de vent, il ne fut accompagné d'aucune manifestation orageuse.

L'été 1922 a été bien plus troublé à Strasbourg. Du 22 juillet au 2 septembre j'ai noté 12 journées accompagnées d'orages locaux. Or l'examen des sondages effectués à Strasbourg pendant cette période montre *que tous ces orages, sans exception, ont été précédés de vents tournants caractéristiques.*

Il y a lieu de remarquer toutefois que les vents des régions *est*

et *ouest* peuvent ne se trouver à Strasbourg qu'à une certaine altitude (400-800 mètres), les vents au sol subissent l'influence directrice de la vallée du Rhin. Ce fait ressort de l'examen des sondages exécutés en 1921. D'ailleurs des statistiques basées sur de très nombreuses observations au sol montrent combien est réelle l'influence de la double chaîne de montagnes qui borde la vallée.

D'après R. Assmann (1) qui a basé ses calculs sur près de 18 000 observations, faites de 1892 à 1907, les directions des vents observées au sol se répartissent à Strasbourg de la façon suivante :

N.	32,8 %
N.E.	4,5
E.	2,3
S.E.	3,7
S.	31
S.W.	10,7
W.	11,2
N.W.	3,5
Calme	0,3

Une nouvelle statistique faite pour la période de 1912 à 1920 donne les chiffres suivants :

N.	19 %
N.E.	13
E.	3
S.E.	3
S.	23
S.W.	17
W.	9
N.W.	6
Calme	6

On ne s'étonnera donc pas si à Strasbourg des vents d'*est* que l'on devrait logiquement observer au sol n'apparaissent qu'à une certaine altitude.

Le sondage tournant dont je viens de parler pour la saison d'été doit être pris aussi en sérieuse considération pendant l'hiver. Il est le meilleur précurseur d'une dépression et d'un adoucissement de la température.

Le 5 janvier 1918 il gelait et le froid persistait depuis le 26 décem-

(1) Die Winde in Deutschland von R. Assmann, 1910.

bre. Le service routier de la IIIe armée nous demandait instamment de prévoir le dégel. Or voici les sondages du 5 janvier 1918 par baromètre marquant 770 mm.

ALTITUDE	16 h. 30		20 h. 30	
	Direction	Vitesse	Direction	Vitesse
sol	20	4	18	7
500	23	5	19	7
1000	21	7	23	6
1500	25	7	27	9
2000	30	5	29	9
2500	32	5	29	12
3000	32	7	»	»
3500	38	6	»	»
4000	35	6	»	»

Si le sondage de 16 h. 30 nous laissait indécis, celui de 20 h. 30 enlevait tous nos doutes. La prévision du 2 au soir portait donc : Demain dégel dans la soirée. **Jamais nous n'avions été meilleurs prophètes.**

§ VI. — *Régime dépressionnaire* :

Caractères : a) *Baromètre au-dessous de 760.*

b) *Sondages dirigés.*

Le régime dépressionnaire établi sur un lieu, les sondages sont *dirigés*, du moins tant qu'on n'est pas vers le centre de la dépression et abstraction faite de la plus grande convergence des vents inférieurs. Les vents modérés au sol croissent généralement en force avec l'altitude. Leur direction varie avec la position relative du centre dépressionnaire.

Des vents S.S.E. ou E. indiquent une dépression venue des Açores ; des vents S.W. à W. caractérisent une dépression venue du moyen ou du haut Atlantique. Des sondages répétés font connaître la marche de la dépression. Le ciel est complètement couvert, les pluies sont abondantes avec des vents du secteur S. à W. Le ciel se découvre partiellement et on n'a plus que des averses dès que les vents dépassent l'W. pour atteindre le N.W., mais alors

la température s'abaisse considérablement. *Le centre dépressionnaire est généralement situé sur la normale à la direction des vents vers 1000 m. d'altitude.* Cette règle, de même que celle de Buys-Ballot, n'a aucune signification :

a) sur un vaste plateau anticyclonique où les sondages sont absolument variables et irréguliers.

b) vers le centre d'une vaste dépression, autrement dit sur une *zone plate* où on n'observe presque aucun gradient et où des échauffements locaux peuvent amener des vents variables, tourbillonnaires et par le fait quelquefois orageux (cuvettes barométriques).

§ VII. — *Dépressions méditerranéennes* :

On ne s'étonnera pas, même en France septentrionale de voir le *baromètre en baisse par des vents inférieurs et supérieurs des régions N.N.E., N.E.. E., S.E.*

Les 13, 14, 15 avril 1918 nous avions à Clermont (Oise) des vents dépressionnaires des régions N.E. Au matin du 13 avril leur force anormale dans la couche 1000-1500 mètres rompait le câble de cinq ballons de protection sur le front de la IIIe armée.

Le 28 avril 1918 le baromètre était en baisse : 763,9, 763,4, 762,7 et voici les sondages :

28 avril 9 h. 50	Altitudes	sol	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000
	Direction	38	»	»	»	2	»	4	4	8	9
	Vitesse	2	»	»	»	5	»	7	5	4	4
17 h. 50	Direction	38	2	8	»	8	»	12	14	15	
	Vitesse	1	5	4	»	6	»	13	11	14	

Une dépression golfe de Gênes (centre : 757, 5) s'étendait sur le S.E. de la France ; le 29 avril au matin elle nous avait atteint. Voici le sondage du 29 avril, 13 heures (baromètre 757)

Altitudes	sol	1000	2000	3000	4000	5000
Direction	38	3	6	9	8	8
Vitesse	1	4	5	11	8	7

Le temps avait été brumeux, les ciels étaient bas et couverts par des stratus cumuliformes, nous avions eu quelque bruine la nuit.

Si les vents supérieurs atteignent le S. et le S.-W., la dépression méditerranéenne s'étend sur l'Espagne, le Golfe de Gascogne et

l'Atlantique. Le fait est confirmé par les sondages du 14 et 15 mars 1918. Le 14 mars à 20 heures le baromètre était en baisse ; 763,3.

14 mars 20 h.	Altitudes	sol	500	1000	1500	2000	2500	3000
	Direction	4	8	10	11	11	11	11
	Vitesse	4	9	12	10	8	7	8

la dépression est sur la Méditerranée.

Examinons le sondage du 15 mars 1918 qui, effectué à Dugny, précéda de quelques instants la trop fameuse explosion de la Courneuve.

15 mars 15 h.	Altitudes	sol	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
	Direction	10	8	9	34	33	30	29	29
	Vitesse	5	8	8	2	4	7	7	7

La dépression sise sur la Méditerranée a gagné l'Espagne, le Golfe de Gascogne et l'Atlantique. Le ciel d'abord clair se couvre dans l'après-midi sous l'influence des vents marins.

Toutefois, malgré un baromètre en baisse et des vents inférieurs et supérieurs des régions E. la dépression de Méditerranée ne s'étendra pas si les vents rétrogradent vers le N. ; elle sera comblée par un anticyclone venant du N. ou du N.-W (2 juillet 1918).

§ VIII. — *Eloignement d'une dépression. — L'anticyclone revient. — Indices d'une nouvelle dépression.*

Lorsqu'une dépression s'éloigne sur la Scandinavie ou la Baltique, les vents en hauteur passent progressivement de l'ouest vers le Nord. Les vents inférieurs peuvent être forts s'il y a concordance entre les vents anticycloniques nouveaux et les vents dépressionnaires. Le ciel couvert d'abord à cause des vents d'ouest laissera bientôt apercevoir de belles nappes bleues dès que le sondage en hauteur donnera des vents N.W. Ces nappes s'élargiront de plus en plus et l'on aura enfin de superbes éclaircies (11 novembre 1917). Le baromètre sera en hausse, la température moyenne sera en baisse. C'est à ces éclaircies que sont dues les gelées printanières si redoutables au point de vue agricole (Lune rousse)

Il n'est pas rare de voir fusionner une dépression Mer du Nord et une dépression sur Méditerranée. Les isobares se mettent alors en réseau N.S. Les vents soufflent du N.N.W. ou du N., jusqu'à

grande hauteur, ils croissent en force avec l'altitude. Le temps est froid, avec giboulées de neige en hiver, averses et grésil au printemps, averses de pluie en été. Les nuits peuvent présenter de belles éclaircies, produisant aussi les gelées printanières.

Lorsque les vents dépressionnaires tournent vers le Nord on peut escompter l'éloignement de la dépression. Mais *toute inflexion des vents supérieurs du N. vers le N.W., l'Ouest et S.W.*, est l'annonce d'une nouvelle dépression venant de l'Atlantique. Bientôt les vents rétrograderont à toutes les altitudes ; le baromètre se mettra rapidement en baisse. Si la rétrogradation ne dépasse pas l'W., et si les vents inférieurs sont forts la nouvelle dépression s'éloignera rapidement (26-27 novembre 1917, 1er décembre 1917).

§ IX. — *Dépressions secondaires* :

On sait que sur la périphérie des vastes dépressions peuvent se former des tourbillons secondaires se détachant du tourbillon principal. Une pareille formation, connue sous le nom de *dépression secondaire* produit d'ordinaire des *grains et des orages* en été, de *la neige* en hiver. Par les sondages aérologiques j'ai pu les caractériser de la façon suivante :

a) *Baromètre en baisse légère* :

b) *Les vents inférieurs éprouvent des rotations anormales que ne peut expliquer le passage d'une grande dépression ;*

c) *Ces vents sont de directions trop différentes pour des stations voisines ;*

d) **Les rotations anormales des vents inférieurs se produisent uniquement dans la couche 0-2000 m. Au-dessus d'eux on retrouve les vents de la dépression principale.**

A titre d'exemples je veux citer les faits suivants :

Le 4 mai 1917, le baromètre était en baisse par des vents S.S.E. Une dépression venue des Açores pouvait donc être prévue. Mais de cette dépression se détache une secondaire se dirigeant vers le N.-E. de la France.

Examinons les sondages :

ALTITUDES	4 MAI		5 MAI							
	19 heures		6 h. 30		10 h. 30		14 h. 30		18 h. 30	
	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse
sol	12	2	27	6	31	2	28	2	33	3
500	13	3	28	8	28	3	28	2	33	3
1000	18	3	29	5	27	3	25	3	33	3
1500	18	3	27	4	28	4	23	4	33	2
2000	19	3	23	4	23	4	22	5	20	2
2500	19	4	22	7	22	6	22	5	25	3
3000	19	4	21	5	22	9	23	6	23	4

Ces sondages sont caractéristiques d'une dépression secondaire qui n'atteint que les vents de la couche de 0-2000. Voici ses effets le 5 mai : Toutes les stations d'armée signalent des orages dans la soirée ou dans la nuit du 5 au 6 mai. Des orages éclatent aussi à Poitiers (13 h. 30), Auxerre (14 h. 30), Gien (15 h. 15), Flers (16 h.), Orléans (16 h. 30), etc.

Le 13 mai 1917 une dépression sise sur la mer du Nord pousse une pointe sur la France septentrionale.

ALTITUDES	12 MAI		13 MAI						14 MAI		
	18 h. 30		6 h. 30		10 h. 30		14 h. 30		6 h. 30		14 h 30
	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	Vitesse	Direct.	vitesse	
sol	22	1	0	0	8	4	40	4	38	4	Sondage dirigé
500	20	4	0	0	18	2	5	4	40	7	
1000	17	6	22	1	26	6	15	5	5	4	
1500	18	5	23	6	22	5	20	7	13	6	
2000	23	5	23	6	21	6	27	8	22	6	
2500	24	6	26	11	23	10	27	11	23	4	
3000	21	6	»	»							

Les vents de la couche 0-2000 subissent des rotations anormales

13 mai : Chartres, 6 h. 30 orage violent.
Crugny, 7 h. 46 —
Rosnay, 8 h. 46 —
Tours, 9 h. 30 —
Caen, 10 h. 55 —
Satory, 11 h. 55 —
14 mai : Dugny, 2 h. 15 orage
Noyon, 3 h. 12 —
Berzy, 3 h. 45 —

Les 28 et 29 juillet 1917 une dépression secondaire traversait la France du N.W. vers l'Est. Les sondages nous montrent encore que seule la couche 0-2000 m. était bouleversée et voici l'histoire de la journée :

29 juillet :	Chartres,	7 h. 14	grain
	Satory,	8 h.	orage
	Dugny,	9 h. 25	orage
	Noyon,	9 h. 40	—
	Chartres,	11 h. 15	—
	Etampes,	13 h. 30	—
	Châlons,	17 h. 30	—
	Dijon,	17 h. 30	—
	Souilly,	17 h. 10	—
	Belfort,	21 h. 15	—

On voit par ces quelques exemples combien il faut se méfier, par baromètre en baisse et voisin de 760, des rotations anormales des vents dans les couches inférieures. On peut s'attendre alors à des perturbations atmosphériques très prochaines, leur durée n'excèdera guère 24 heures. De pareils tourbillons se forment aussi dans les *cols isobariques* reliant deux vastes centres dépressionnaires et y produisent des temps détestables. J'ai indiqué qu'un rayonnement terrestre important pouvait les créer en des points sis sur des *zones plates* où le gradient barométrique est presque nul. Enfin les flancs des montagnes peuvent agir de deux façons. Sur eux se produisent des réflexions de vents propres à engendrer des dépressions locales, mais aussi leur rayonnement parfois intense, en créant un gradient thermique superadiabatique peut détruire l'équilibre des masses et amener *les orages dits de montagne.*

Je viens d'exposer les remarques faites à la suite de nombreux sondages régulièrement répétés. Elles se résument dans les tableaux suivants qui peuvent être utiles à la prévision du temps.

§ X. — 1° **Sondages tournants très irréguliers.** — *Vents inférieurs et supérieurs faibles ou très faibles. — Baromètre à 770 et au-dessus en hiver.* — C'est le plateau anticyclonique. Beau temps : brume ou brouillard le matin, ciel 1/4 ou 1/2 couvert le jour par cumulus épars disparaissant entièrement vers 16 ou 17 heures. nuits claires.

Mêmes sondages par baromètre voisin de 760 mais au-dessous. — Se méfier des orages locaux en été.

2° **Sondages dirigés**. — *Vents inférieurs et supérieurs modérés. Baromètre : 766, 767, 768.* — *a)* Vents des régions N.W. : Hautes pressions Atlantique, ciel plus ou moins couvert.

b) Vents des régions W. : Basses pressions au nord de l'Europe, ciel couvert.

c) Vents des régions N., N.E : Hautes pressions Angleterre, ciel plus découvert.

d) Vents des régions E. ou S.E. : Hautes pressions Europe centrale, beau temps, froid en hiver.

3° **Sondages à angle brusque**. — *Baromètre assez haut. Vents inférieurs des régions E., Vents supérieurs des régions N.-W.* — Annonce d'une dépression venant d'Islande.

a) L'angle brusque se trouve à des altitudes de plus en plus élevées : La dépression n'est pas dangereuse, beau temps.

b) L'angle brusque se trouve à des altitudes de plus en plus basses, les vents supérieurs rétrogradent vers l'Ouest et croissent en force : La dépression s'avance vers l'Angleterre, éclaircies dépressionnaires, cirrus.

c) Les sondages deviennent dirigés des régions S.W. : La dépression nous aborde vers l'Angleterre ou la Manche, le ciel se couvre bas, quelques coups de vent, pluie sans orage.

d) Les sondages deviennent tournants (conformément à la règle donnée) : La dépression a poussé une pointe sur le Golfe de Gascogne, grains et orages prochains, neige en hiver.

4° **Sondages rectilignes**. — *Baromètre haut. Vents inférieurs et supérieurs des régions N.-W.* — Nous sommes sur un plateau anticyclonique à centre haut Atlantique.

a) Les vents supérieurs croissant anormalement en force : une dépression existe vers l'Islande.

b) Les vents inférieurs et supérieurs augmentent en force : L'anticyclone résiste, coups de vent à craindre, grésil, averses.

c) Les vents supérieurs rétrogradent vers l'Ouest : La dépression s'avance.

d) Les vents inférieurs rétrogradent aussi vers l'Ouest et le Sud-Ouest : La dépression nous atteint.

e) Les vents inférieurs rétrogradent vers le S.E., le sondage devient tournant : La dépression a poussé une pointe vers le Golfe de Gascogne, grains et orages imminents.

5° **Sondages à angle brusque.** — *Baromètre haut. Vents inférieurs des régions N. ou E. Vents supérieurs des régions S W. à W.* — Une dépression vient des Açores.

a) L'angle brusque se trouve toujours haut : La dépression n'est pas encore dangereuse.

b) L'angle brusque descend progressivement : La dépression s'avance.

c) Le sondage devient tournant : La dépression atteint le Golfe de Gascogne, l'Espagne, le bas Atlantique ; grains et orages.

6° **Sondages rectilignes.** — *Vents inférieurs et supérieurs des régions E. Baromètre haut.* — Nous sommes sur un plateau dont le centre est sur l'Europe orientale.

a) Le sondage reste dirigé de l'E. ou du S.E. : Le baromètre baisse, une dépression atteint la Méditerranée.

b) Le sondage reste dirigé, les vents supérieurs croissent en force : La dépression est dangereuse.

c) Le baromètre atteint 760, sondages rectilignes : Invasion de la dépression sise sur la Méditerranée.

d) Baromètre au-dessus de 760, vents supérieurs atteignant le S., puis le S.W. et même l'Ouest : La dépression méditerranéenne s'étend sur l'Espagne, le Golfe de Gascogne, l'Atlantique.

e) Le sondage devient tournant : Le baromètre descendra rapidement, *grains et orages.*

f) Baromètre en baisse, mais vents supérieurs tournant de l'E, au N.E., puis au N. et N.W. : Un anticyclone venant du N.W. comblera la dépression.

7° **Régime dépressionnaire.** — Etudié spécialement page 68

8° **Indices d'une nouvelle dépression.** — Voir page 70

9° **Dépressions secondaires.** — *Vents de la couche 0-2000 variant anormalement entre deux sondages, ces vents étant trop différents entre deux stations voisines. Vents au-dessus de 2000 de direction sensiblement constante.* — Grains et orages en été, neige en hiver.

Mes observations proviennent de la région de Noyon ou des confins de l'Oise et de la Somme. Je n'ai pu leur donner une certaine généralisation qu'en examinant (janvier, février, mars 1918) les nombreux sondages transmis à la station centrale à Dugny par les différentes stations météorologiques d'armées. Je crois avoir contribué à ce fait important que dans les prévisions au front on ne négligeait plus l'allure des vents en hauteur.

Et malgré tout, la météorologie aux armées a été souvent critiquée. On disait vulgairement et on écrivait même ironiquement : « Les Français attaquent, donc il va pleuvoir, les Allemands attaquent, c'est donc le beau temps. » Voilà encore une triste façon de dénigrer la science française. Si l'on tient compte de l'usage terrible des gaz asphyxiants, quand pouvions-nous attaquer sinon par vents Sud, Sud-Ouest ou Ouest ? Mais ces vents sont nécessairement les précurseurs de la pluie. L'ennemi au contraire attendait les vents du Nord-Est et de l'Est, vents qui caractérisent les périodes de beau fixe. La météorologie française n'a donc pas fait faillite et j'aime à croire, qu'utilisant plus que jamais les sondages aérologiques elle deviendra beaucoup plus scientifique.

On a prétendu que les indications des stations de montagne (Pic du Midi, Aigoual, Puy-de-Dôme, etc...) pouvaient remplacer avantageusement les données des sondages. Il n'en est rien. Tout d'abord les vents à 1500-2000 mètres ne suffisent pas pour une bonne prévision ; je veux savoir l'allure des vents aux différentes altitudes, au-dessus d'un point donné.

Enfin il me paraît que toute installation sur un sommet et même sur un plateau trop étroit, ne peut indiquer les vents que le sondage donnerait à la même altitude en opérant sur une vaste plaine Jamais nous n'avons pu satisfaire les sections de repérage par le son en prenant les vents au sol sur une hauteur quelconque. Il existe sur les pentes des compressions d'air qui produisent au sommet des vents irréguliers. A tel point qu'en sondant à Noyon sur une colline dominant la ville, notre pilote, doué cependant de la force ascensionnelle ordinaire, était bien souvent rejeté dans la vallée. J'ai pu observer le même phénomène à Laon, sur le point culminant qui domine la vaste plaine S.W. (Batteries Morlot) ; notre ballon-pilote, après s'être élevé de quelques mètres, était parfois violemment rejeté au sol. Mes amis de la station météorologique de l'armée d'Italie ont remarqué le même fait en sondant sur les Alpes italiennes. On ne peut donc compter sur les données d'un anémomètre installé au sommet d'une montagne.

J'ai montré l'utilité des sondages au point de vue prévision. Mais de même qu'un météorologiste ne peut sainement mettre à profit les cartes isobariques que grâce à une grande expérience et des habitudes professionnelles, j'estime aussi qu'une longue éducation est nécessaire pour interpréter les vents en hauteur.

CHAPITRE VII

Parasites atmosphériques

Je veux indiquer ici une *nouvelle contribution à la prévision du temps* basée sur des observations que j'ai pu faire durant la guerre et surtout à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg au cours des étés 1921 et 1922. Ces observations se rapportent aux *parasites atmosphériques.*

Une des causes les plus fréquentes de gêne dans la télégraphie sans fil est la présence de troubles électriques naturels qui produisent de forts bruits ou des craquements au téléphone et rendent la lecture des signaux très difficile et parfois impossible.

On sait depuis longtemps que les décharges électriques orageuses exercent une influence sur les lignes téléphoniques. Des archives des Sciences physiques et naturelles de Genève (1881, t. VI, p. 217) on extrait la note suivante de D. Colladon :

« Un fil de cuivre tendu entre deux toitures et en relation avec le sol « communiquait à deux téléphones. M. Thury a observé que,à cha- « que orage, rapproché ou lointain, la production des éclairs était « régulièrement accompagnée d'un bruit caractéristique dans le « téléphone. Ce bruit était toujours perçu à l'instant même où « l'on voyait l'éclair, alors même que l'orage était trop éloigné « pour qu'on entendit le bruit du tonnerre. M. Thury compare « ce bruit à celui d'une allumette suédoise frottée sur sa boîte, et « en évalue la durée à une demi-seconde au plus. »

M. Colladon rapproche ces expériences des expériences analogues qu'il a réalisées, dès 1826, à l'aide d'un galvanomètre spécial

construit pour la mesure des courants des machines à frottement (1).

M. O. Lodge, a le premier, émis l'opinion (1894) que les décharges électriques de l'atmosphère sont *probablement* de *nature oscillante* Il est acquis aujourd'hui que la foudre produit des oscillations électriques dans les conducteurs voisins et par conséquent des ondes dans l'atmosphère (2). On lit toutefois dans J. E. Murray : (3) « L'origine de ces troubles est restée douteuse jusqu'en « 1911 où j'ai eu l'occasion d'écouter les atmosphériques et d'obser- « ver en même temps un orage dans les environs. Chaque éclair « produisait un atmosphérique ordinaire..... La conclusion est donc « que les atmosphériques sont en général des ondes électriques « naturelles produites par des éclairs».

Quoi qu'en dise J.-E. Murray nous allons montrer que bien avant lui on avait considéré les orages comme producteurs d'ondes.

Dès 1895, Popoff (4) avait fait usage d'un long conducteur vertical comme une tige de paratonnerre en connexion avec un cohéreur dans le but de suivre les mouvements des orages à éclairs à travers l'atmosphère.

En Italie, dès 1900, Boggio-Lera, à Catane (5), enregistrait les décharges d'orages lointains en utilisant le principe des ondes hertziennes et des cohéreurs.

Th. Tommasina (6) indique aussi en 1900 que l'une des applications de l'auto-décohérence du charbon peut prendre une place importante dans l'étude des orages lointains par *l'électro radiophone*, c'est le nom qu'il donne à un appareil pouvant signaler, en les traduisant par des sons, les radiations produites par les décharges électriques proches ou lointaines. Bientôt après (7) Tommasina montre qu'il a pu enregistrer des orages à plus de 400 k. de distance ; il ajoute que quelques éclairs ne produisent pas d'ondes électriques. J. Harden (8) avait aussi signalé, en 1900,

(1) *Annales de chimie et de physique*, 2me série, t. XXXIII, p. 62.
(2) Loisel. *Les orages*. Paris, G. Thomas.
(3) J.-E. Murray. *Manuel de T. S. F.* Traduction de H. Magniez.
(4) Popoff. *Journ, Soc. phys-chim. russe* 28-29, 1895.
(5) Meteo. Zeitsch. 1901, 136.
(6) *C. R.* Ac. des sc. 131-1900, 870-878.
(7) *C. R.* Ac. des sc. 133-1901, 1901-103.
(8) Elect. Z. S. 21-800, 1900.

que tous les éclairs ne constituent pas des décharges oscillantes. La même observation est faite aussi par J. Fenyi (1).

C'est surtout à M. A. Turpain (2) que l'on doit, en France, les premières recherches sur l'utilisation des antennes et les dispositifs de T. S. F. pour l'étude des orages. Le 19 Juin 1902, à 11 h. 30 du matin il prévoyait à Pavie, près de St-Emilion (Gironde), un orage qui éclatait sur Pavie à 4 h. du soir. A. Turpain utilisa d'abord le détecteur à limaille et l'enregistrement graphique auquel il ajouta un avertisseur par sonnerie électrique. Il ajouta ensuite le cohéreur à aiguille de J. Fenyi (3) et associa l'appareil à un baromètre enregistreur. Plus tard il eut recours à un enregistreur bolométrique avec détecteur thermique. Enfin M. A. Turpain emploie l'enregistrement graphique au moyen d'un micro-ampèremètre à inscription continue (4). En 1912, A. Flajolet (5) utilise le poste de l'Observatoire de Lyon avec détecteur électrolytique, puis à sulfure de plomb pulvérulent.

En Angleterre W. H. Eccles et M. H. Airey (6) se demandent si les parasites atmosphériques sont dus à des coups de foudre très éloignés ou à des causes extra-terrestres. Pour résoudre le problème l'un d'eux observe à Londres, l'autre à Newcastle en commençant et en finissant à la même heure. Les corrélations des heures de leurs observations étaient rendues aussi précises que possible grâce aux signaux horaires quotidiens de la Tour Eiffel, de Poldhu et de Norddeich. Les deux observateurs enregistrent eux-mêmes sur une bande de papier, où six pouces représentent une minute, les pertubations entendues au téléphone. Un grand nombre de marques faites indépendamment par les deux observateurs coïncident convenablement comme époque et aussi dans leurs formes. Ce dispositif n'étant pas automatique, l'équation personnelle inter-

(1) J, Fenyi. Met. Zeitsch 1903, 41.

(2) A. Turpain. La prévision des orages au moyen des cohéreurs. *C. R.* de l'Association française pour l'avancement des sciences. Montauban 1902.

(3) J. Fenyi. Ueber konstruction und Funktion eines einfachen Gewitterregistrators Met. Zeit. 1903, 462.
A. Turpain. *Le Radium* 8-1911-419.

(4) A. Turpain. *Le Radium* 8-1911-388.

(5) A. Flajolet. Contribution à l'application de la T. S. F., à l'étude et à l'annonce des orages. Memoires, Ac. Sc. Lett. et Arts de Lyon (1912).

(6) Proc. Roy. Soc. 85-1911-145.150. *Le Radium* 8-1911-235.

vient ; il indique néanmoins que 60 à 80 % des perturbations entendues à Londres et à Newcastle sont dues à la même cause.

Des expérimentateurs américains s'occupèrent en 1918 d'améliorer la réception des signaux européens. Plusieurs séries d'observations méthodiquement organisées au cours de l'année 1920 par M. L. W. Austin (1), Chef du Laboratoire radiotélégraphique de la Marine des Etats-Unis, donnent la conclusion générale suivante :

« Sur la côte *est* les perturbations proviennent en grande majorité « des plaines chaudes du Mexique ; sur la côte *ouest*, les sources « de ces perturbations semblent localisées sur des montagnes « élevées peu éloignées des postes d'observation. Dans tous les cas « les atmosphériques viennent de la terre et non de la mer..... Il « n'est pas encore possible de formuler une théorie complètement « satisfaisante des atmosphériques, mais il paraît problable qu'ils « ont pour cause de puissantes décharges entre des masses d'air « se trouvant à des potentiels différents. »

L'auteur conclut en faisant ressortir que ces premiers résultats, si incomplets qu'ils soient, montrent l'importance qu'aurait l'organisation d'un plan général et mondial d'observation des atmosphériques.

Plus récemment encore, S. Wiedenhoff (2) analyse des observations méthodiques faites à la station radiotélégraphique de recherches de Strelitz. Au sujet des atmosphériques l'auteur distingue le *claquement* isolé dont il compte le nombre pendant un temps donné et le *bourdonnement* ou *crépitement* continu dont il note l'intensité. Ses conclusions sont : Le nombre moyen de claquements dans les différents mois de l'année est très variable. Il existe une variation périodique diurne des parasites, un maximun en août et septembre, un minimum en février. L'observation simultanée de données météorologiques : pression, température, état hygrométrique, vent, état du ciel et chute de potentiel dans l'atmosphère, ionisation, a pu faire constater qu'aux périodes de parasites intenses correspondent de faibles variations de potentiel atmosphérique et une grande ionisation. Des observations ont été faites en différents points. La loi périodique quotidienne se

(1) L.-W. Austin. Journal of the Franklin Institute : mai 1921, 191, p. 619 630. — *L'Onde électrique*. n° 1, janvier 1922

(2) Communication des services des P. T. T. allemands. Iahrbuch. Octobre 1921. B. 18. S. 242. *L'Onde électrique*. N° 2. Février 1922.

retrouve partout, mais des maxima et des minima se produisent en différents points à des périodes différentes de l'année. La situation des postes influe très nettement sur l'intensité et le nombre des parasites. Norddeich, au bord de la mer, a beaucoup moins de parasites que les postes situés à l'intérieur de l'Allemagne.

C'est en 1911 que M. E. Rothé, alors professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, utilise le galvanomètre de Duddel pour la mesure relative de l'intensité des décharges et montre que les *parasites* ne sont pas dus simplement à des orages locaux, mais à des phénomènes plus lointains :

Au cours de la guerre (1), M. E. Rothé, à la Direction des Inventions, appliquant pour la première fois la radiogoniométrie à l'étude des orages, indique qu'on trouve, pour les parasites atmosphériques, des directions privilégiées, variables suivant les jours et les heures, et montre **que le radiogoniomètre permet de suivre la marche d'un orage.**

A la suite de nouvelles observations réalisées à partir de 1919, à l'Institut de physique du Globe de Strabourg, dont il est actuellement le Directeur, M. E. Rothé et ses collaborateurs, (2) peuvent affirmer par une méthode inédite, celle du radiogoniomètre, qu'on trouve des directions privilégiées pour les parasites quand les nuages orageux sont au loin à l'horizon ; quand l'orage est trop voisin les parasites s'observent dans tous les azimuts. Il est amené en 1920 à distinguer différentes sortes de parasites suivant la nature des bruits perçus au téléphone.

I

Au cours du printemps 1918, j'avais demandé à mes camarades du poste émetteur et récepteur de la Station météorologique de la III^me^ armée de vouloir bien me signaler les jours durant lesquels les parasites devenaient particulièrement gênants pour la réception. Je pus alors dresser le tableau suivant correspondant aux jours à parasites violents.

8 avril : Une dépression venue d'Islande aborde l'Angleterre.
10 avril : Une dépression s'annonce sur le golfe de Gascogne.
11 avril : Dépression sur le même golfe.

(1) E. Rothé. *Annales de physique.* 9^me^ série XVII. mai. juin 1922.
(2) Voir *Ibid.*

13 avril : Dépression sur le même golfe.
14 avril : La dépression précédente envahit la Méditerranée et pousse une pointe sur la vallée du Rhône.
16 avril : Dépression golfe de Gênes.
18 avril : La France est une aire de basses pressions où peuvent exister des tourbillons secondaires.
24 avril : Col isobarique s'étendant du Sud à l'Est de la France.
28 avril : Dépression golfe de Gênes.
29 avril : La dépression envahit l'Espagne.
30 avril : La dépression s'étend sur la France.
3 mai : Dépression golfe de Gascogne.

Ces quelques observations me montraient déjà que les parasites atmosphériques perçus à Clermont (Oise) sont particulièrement violents au moment où une dépression aborde la France, ou lorsque notre pays est couvert par une aire de basses pressions favorables aux tourbillons secondaires.

Mais la réception faite par antenne fixe ne peut permettre d'autres indications.

II

Au cours de l'été 1921, M. Rothé (1) m'a proposé de venir collaborer à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg aux recherches indiquées ci-dessus, recherches qu'il avait lui-même entreprises pour la 1re fois, pendant la guerre en 1917 (2) et pu continuer depuis grâce au bienveillant concours du Dr. Henri de Rotschild. Il s'agissait de suivre au radiogoniomètre la marche des orages et de rechercher les influences atmosphériques sur la propagation et l'orientation des ondes hertziennes. Une étude plus approfondie des parasites atmosphériques m'a donc été facilitée puisque le cadre radiogoniométrique (3) permet de trouver non seulement l'époque des maximums mais aussi la direction d'origine.

(1) Je tiens à remercier ici M. Flahaut, Membre de l'Académie des Sciences, Professeur à la Faculté de Montpellier, d'avoir bien voulu me mettre en rapport avec M. Rothé.

(2) Voir *Annales de Physique*. Mai-juin 1922 T. XVII. Expériences de Saint-Cyr 1917-1918.

(3) Voir : Réception par cadres radiogoniométriques. Les applications de la T. S. F. — E. Rothé Berger-Levrault. Paris.

Les parasites entendus au téléphone donnent des sensations très différentes. On y distingue des *craquements* comparables au bruit d'un morceau de bois que l'on brise, des *claquements* de note plus élevée que les précédents, mais plus brefs et plus secs et enfin des *décharges*, manifestations plus rares, de plus longue durée, présentant un bruit métallique intense, de note très élevée et conservant pendant leur durée la même intensité et la même hauteur.

Cette distinction des parasites à l'oreille de même que la recherche de la direction de leur maximum d'intensité ou de fréquence nécessite une grande habitude. *J'ai été amené à compter les parasites par minute suivant les divers azimuts de 20° en 20°. Parfois il faut diminuer l'amplification pour éteindre les nombreux craquements ou claquements et ne percevoir que les charges plus importantes. Enfin le maximum trouvé on contrôle la direction en mettant le cadre à 90 degrés pour obtenir le minimum. On trouve souvent plusieurs maximums très nets et le cas est des plus intéressants.*

Les observations des parasites, pour être fructueuses, doivent être fréquentes dans une même journée. Dans ce cas seulement on peut suivre avec profit les déplacements des maximums et surprendre des phénomènes qui échapperaient sans nul doute à des observations trop espacées.

Enfin on peut substituer au téléphone un appareil inscripteur. M. Rothé m'a engagé à installer pour l'inscription des parasites l'oscillographe à fer mobile de M. Abraham qu'il s'était procuré à cet effet (1). Les bandes d'inscription, faites d'ordinaire alors que le cadre est dirigé vers les maximums, révèlent les différents genres de parasites. Les craquements et claquements s'enregistrent par des encoches isolées ; les décharges par une série ininterrompue de vibrations dont la durée atteint parfois plusieurs secondes.

Le 10 août 1921, à 15 h. 30, j'ai pu enregistrer des éclairs visibles dus à un orage sur Stasbourg, quelques jours plus tard j'enregistrais aussi des éclairs accompagnés de grêle. Ces éclairs visibles se traduisent bien comme il a été dit pour les décharges. Il est donc hors de doute que toutes les décharges inscrites ou entendues correspondent à des éclairs plus ou moins lointains.

L'amplitude des vibrations dans les décharges diminue avec des

(1) La description de cette oscillographe est contenue dans les C. R. de l'Ac. des Sc. 169, II, 171-174.

régions orageuses de plus en plus éloignées. Des orages sur le Midi de la France peuvent se distinguer de ceux qui éclatent dans la région du N. ou du N.E. D'autre part les encoches isolées disparaissent presque avec des régions orageuses voisines. On pourrait conclure de là que les encoches isolées, propres aux craquements et claquements, correspondent aux maximums de décharges lointaines. Le 5 août j'entendais et j'enregistrais uniquement de nombreux craquements paraissant venir du N.W. et la presse signalait bientôt après de nombreux orages sur le nord de l'Angleterre. Ces orages étaient du 5 août et amenaient la fin d'une période de sécheresse exceptionnelle sur ces régions.

Généralement les décharges peu nombreuses dès les premières heures du jour croissent en nombre dans l'après-midi pour diminuer dans la soirée. Cette remarque ne fait que confirmer la distribution horaire des orages d'après M. Angot. Si on répartit toutes les observations d'orages relevées à Paris pendant la période de 20 ans en huit périodes de trois heures on trouve que sur un total de 1000 orages il s'en présente le nombre suivant dans chaque période.

minuit	à 3 h.	52	12 h.	à 15 h.	242
3 h.	à 6 h.	40	15 h.	à 18 h.	304
6 h.	à 9 h.	43	18 h.	à 21 h.	173
9 h.	à 12 h.	53	21 h.	à minuit	93

On observe plus de la moitié du nombre total des orages entre midi et 18 heures. Von Hann (1), dans son livre de météorologie, fait les mêmes remarques au sujet de l'Ecosse, de la Norwège, de l'Allemagne, etc...

Cette distribution horaire n'implique pas nécessairement un maximum constant des parasites dans la soirée.

Le 28 juillet, à 5 h. 20, je percevais à Strasbourg des parasites très violents venant du N.N.W. et des orages nous étaient bientôt signalés, à cette heure, sur la vallée de la Moselle.

Le 3 août, à 7 heures, les parasites étaient plus violents encore sur tous les azimuts et les orages faisaient rage sur toute la vallée de la Moselle, sur tout le plateau de Lorraine, sur les Vosges moyennes.

Les 10 et 11 août les parasites étaient déjà violents à 7 heures.

(1) Von Hann. Lehrbuch der Meteorologie, p. 680.

Le 10 août, dès le matin, par un magnique ciel sur Strasbourg, j'enregistrais des décharges presque continues dans la direction S.W. alors que des pluies orageuses torrentielles inondaient le midi de la France et provoquaient une crue de la Garonne.

Les mêmes remarques ont pu être faites les 22, 23, 29 août, les 9 et 16 septembre.

On peut être frappé du nombre de parasites perçus dans une journée. Nous n'avons en somme aucune idée du nombre réel des décharges atmosphériques. Le jour où on notera tous les orages qui éclatent sur les différents pays on sera bien moins surpris de la fréquence des parasites entendus. Il ne faut pas perdre de vue que les ondes naturelles doivent transporter une grande énergie et peuvent être détectées à des distances considérables. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir souvent des inscriptions presque continues. Teisserenc de Bort affirme avoir vu des orages avec 27 ou 28 éclairs par minute. D'autre part, Von Hann indique qu'il peut exister des décharges silencieuses à très grande hauteur, le son se propageant fort mal dans ces régions ; ces décharges auraient lieu dans le domaine des cirro-cumulus, c'est-à-dire à l'avant des dépressions.

Enfin, le jour où le sondage aérologique laisse pressentir des orages prochains est aussi celui où l'on perçoit des parasites très violents. Le fait s'est présenté le 10 août. Dès 7 heures du matin, les parasites étaient extrêmement forts et nombreux, Le sondage de 8 heures ne laissait aucun doute, l'orage devait éclater dans les 24 heures sur Strasbourg. Il est arrivé, en effet, à 15 h. 30, à la suite d'un cyclone venant du S.W. de la France et endommageant gravement le poste de T. S. F. de la Doua à Lyon.

Au printemps 1918, comme je l'ai exposé, il m'avait semblé que les parasites atmosphériques devenaient gênants lorsqu'une dépression abordait la France. Le cadre radiogoniométrique m'a permis de nouvelles remarques pouvant servir à la prévision du temps. *J'ai été amené à rattacher la fréquence des parasites dans une direction donnée à l'existence de dépressions dans cette direction.* Les faits observés m'ont conduit à proposer les lois suivantes.

1° S'il existe une dépression lointaine bien caractérisée, à isobares fermées nettement concentriques, le maximum observé est vers la région Sud ou Sud-Est de cette dépression, le déplacement de la direction du maximum et la variation d'intensité des parasites permettent de suivre la dépression.

2° S'il existe une dépression dont le centre est très éloigné et dont les isobares ont une courbure moins prononcée, le maximum est encore vers la périphérie Sud ou Sud-Est de la dépression, il est moins nettement caractérisé que dans le cas précédent.

3° Les dépressions secondaires, les poches barométriques, les cols barométriques *voisins* correspondent à des fronts orageux et le maximum est difficile à déterminer : les parasites sont alors violents dans tous les azimuts.

4° Un *point orageux voisin* donne des parasites violents dans la direction de l'orage.

Ces observations m'ont permis non seulement de suivre le déplacement des dépressions connues mais encore de prévoir l'arrivée de nouvelles dépressions connues dont l'existence n'a été connue que le lendemain.

A titre d'exemples, j'indiquerai les faits suivants :

28 juillet, 5 h. 20 : Parasites violents sur N.N.W. Orages sur la vallée de la Moselle.

7 h. 20 : Parasites en diminution, plus d'orages en Alsace.

15 h : Maximum net SW. La situation isobarique avait donc changé et en effet une dépression à centre St-Mathieu envahissait le S.W. de la France. (Première loi : prévision d'une nouvelle dépression).

29 juillet, 8 h. 30 : Maximum N.N.W. — Le centre dépressionnaire s'est déplacé sur Shields (première loi : déplacement d'une dépression).

30 juillet : Maximum N.N.E. — La dépression est sur la Baltique. (Première loi : déplacement d'une dépression).

1^er août : Maximum N.N.W. — Je conclus à une nouvelle dépression venue du haut Atlantique, malgré un superbe ciel sur Strasbourg. Cette dépression a déjà son centre sur Torshavn. (Première loi : prévision d'une dépression).

2 août : Maximum N.N.W. — La dépression se trouve dans la même direction. Son centre est sur Stornoway.

3 août : Les parasites violents sur tous les azimuts, dès 8 heures, me font conclure à une poche barométrique voisine, aperçue plus tard sur la carte. — Orages : Vosges, Lorraine, Moselle. (Troisième loi : poche barométrique).

4 août : Maximum N.W. — Donc nouvelle dépression lointaine.

5 août : Maximum N.N.W. — Parasites très nombreux et assez violents. La dépression s'approche. La presse signale de nombreux orages sur l'Angleterre.

6 août : Maximum N. -- La dépression marche vers la droite comme l'indiquera plus tard la carte.

8 août : Maximum N., puis N.N.E., la dépression envahit le Danemark.

9 août : Maximum N.N.E. — La dépression s'éloigne (Dépression suivie par les parasites).

10 août : Des parasites très violents dès le matin sur tous les azimuts me font annoncer une dépression secondaire voisine. Le soir orage sur Strasbourg et dans la région (front orageux connu avant le tracé de la carte).

11 août : Dès la 1re heure les décharges sont continues. Impossible de trouver un maximum. Un violent ouragan est déchaîné sur tout le Chalonnais, il atteint les Vosges et se dirige vers le N.E. Une dépression secondaire née sur le S.W. de la France va se creuser sur le Danemark et occasionne les orages entendus au téléphone les 10, 11, 12 et 13 août.

15 août : Une observation intéressante a été faite entre 13 h. 15 et 14 h. Deux maximums sont trouvés : 1er maximum, N. N.W. Or à cette heure un orage est signalé sur la forêt de Haguenau.

2e maximum, W.S.W. La presse signale des orages sur toute la France sauf sur le S.E.

16 août : Dès 7 h. 30 je trouve deux maximums.

Le 1er W.N.W. correspond nettement au secteur S.E. d'une nouvelle dépression à centre N.W. Irlande et comme à 17 h. 50 je trouve ce maximum sur W je conclus que cette dépression marche vers le Sud (la carte l'indique plus tard).

17 août : Dès le matin les parasites sont faibles sur tous les azimuts. A 11 heures des parasites violents sur le S.W. me font annoncer que la dépression envahit le S.W. de la France (origine des orages dans le Midi).

18 août : Parasites encore plus nombreux et plus violents S.S.W. (continuation des orages dans le Midi. Dépression Golfe de Gascogne).

19 août : Maximum W.S.W. Parasites violents.

20 août : Maximum W.S.W. Léger déplacement.

21 août : Maximum W.N.W. Centre de la dépression Pas-de-Calais. Son voisinage est indiqué par l'intensité parasitaire.

22 août : *Parasites violents* N.N.E. — La dépression précédente occasionne des orages sur le nord de la France, la Belgique, la Hollande.

23 août : Des parasites violents sur tous les azimuts indiquent un front orageux voisin. Orages sur Bitche et sur toute la Lorraine septentrionale.

24 août : Parasites moins violents. La vieille dépression s'éloigne vers la Baltique.

26 août : Dépression ancienne sur Baltique. Or le maximum trouvé dès le matin est N.W. S.E. Je conclus à une nouvelle dépression invisible sur la carte dressée le 26, ou *sur la Mer du Nord* ou *sur l'Adriatique*. La première hypothèse était la vraie.

27 août : Les parasites N.W. deviennent plus intenses, la dépression trouvée se rapproche.

29 août. : Parasites encore intenses mais N.N.W. Le centre dépressionnaire se déplace vers la droite.

30 août : Maximum N.N.E., les parasites faiblissent, la dépression atteint la Baltique.

31 août, 1er, 2, 3, 4, 5, 6 septembre : De hautes pressions établissent leur centre sur nos régions. Les parasites faiblissent.

7 septembre : Nous sommes toujours sur un plateau anticyclonique mais un maximum net apparaît sur le sud. Dépression Méditerranée.

8 septembre : Maximum région S.S.W.. la dépression envahit l'Espagne.

9 septembre : Maximum région W. Tout l'Atlantique est dépressionnaire.

10 septembre ; Maximum, N.W. la dépression se déplace.

11 septembre : Max. N., elle marche vers la droite.

12 septembre : Deux maximums. Le 1er N.-E. attribué à la vieille dépression ; le 2e N.N.W. je l'attribue à une nouvelle dépression visible plus tard sur la carte.

13 septembre : Maximum N. parasites faibles ; la dépression glisse vers la droite.

14 septembre: Parasites faibles. La France et l'Europe centrale constituent un plateau anticyclonique.

15 septembre: Nouveau maximum très net sur S.W. Poche barométrique sur le Golfe de Gascogne, origine de violents orages dans le centre les 16 et 17 septembre.

21 septembre: A 14h heures les parasites deviennent violents sur les azimuts. Je conclus à une poche barométrique voisine, vue le lendemain sur la carte. Orages sur l'Alsace et le N.E. de la France.

III

Au cours de l'été 1922 j'ai poursuivi, en utilisant le nouveau radiogoniomètre de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Strasbourg, l'étude entreprise précédemment.

Le cadre radiogoniométrique employé est formé de cinq sections utilisées pour des longueurs d'onde variant de 1000 à 30.000 mètres.

1 section	1000	à	4200	mètres
2 sections	1800	à	7220	—
3 sections	2800	à	9400	—
4-5 sections	10.000	à	30.000	—

Ce cadre est beaucoup plus développé que l'appareil utilisé au cours de l'été 1921 et permet l'étude de très grandes longueurs d'onde.

Les parasites étaient toujours comptés par minutes sur les azinuts divers de 20° en 20°, la recherche parfois délicate du maximum exigeant une attention particulière. Dans des cas peu nets on est obligé d'effectuer plusieurs tours par observations croisées ou de diminuer l'amplification pour se débarasser des petits craquements accessoires. Toute opération faite à la hâte exposerait à des méprises.

Les observations de 1922, effectuées avec un matériel différent confirment le fait que *la direction dans laquelle on observe le maximum est le plus souvent celle des secteurs sud et sud-est des dépressions et qu'il est possible de prévoir des nouvelles dépressions.*

Le mardi, 25 juillet, le maximum des parasites entendus était de direction W.S.W. E.N.E. A 21 heures ce maximum se trouve sur N.W. S.E. et la carte du 26 juillet indiquera une profonde dépression sur le N.W. de l'Angleterre.

Le 10 août le maximum s'était tenu vers le N. E. sur le secteur

S.E. d'une dépression à centre mer Baltique. Or le 11 août, à 8 heures, je trouve un maximum N.W., S. E. La carte isobarique indiquera une nouvelle dépression au N.W. de l'Angleterre.

A 17 h. 30 le maximum est sur W.N.W., la dépression atteint donc le moyen Atlantique comme le montrera la carte du 12 août ; mais il revient plus tard sur N.N.W., la dépression marche vers la Baltique, comme on le verra avec la carte du 13 août.

Le samedi 19 août le maximum était sur E.N.E., mais à 11 heures apparaît un renfoncement sur N.W., celui-ci se maintient toute la journée, il correspond à une nouvelle dépression visible sur la carte du 20 août.

Au cours du 26 août le maximum passe de E.N.E. sur une dépression mer Baltique à W.N.W. vers une dépression qui le 27 aura son centre sur l'Irlande.

Le cadre radiogoniométrique permet surtout de prévoir les orages. *Dès qu'il n'est plus possible de trouver un maximum, et que sur tous les azimuts on entend ou on enregistre de violentes décharges, l'orage atteint la région.*

Ces faits ont pu être observés, au cours de l'été 1922, les 22, 23, 24, 31 juillet, les 3, 5, 7, 8, 14, 21, 29 août.

A titre d'exemples je résume mes obvervations des 14 et 22 août.

14 août : 8 h. : Décharges nettes, régions W. et W.N.W.
11 h. : Décharges plus fortes.
14 h. : Le maximum descend sur S.W.
18 h. : Violentes décharges sur tous les azimuts.
20 h. : *id.*

Premiers éclairs sur Strasbourg à 21 heures. Violent orage à 23 heures. 42 bulletins d'orages concernant l'Alsace et la Lorraine parviennent le lendemain à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

22 août : 8. h. : Violentes décharges sur tous les azimuts avec renforcement sur N.W. (Un orage est signalé à cette heure au N.W. de Strasbourg).
11 h. : Violentes décharges sur tous les azimuts.
11 h. : *id.*
16 h. 30 : *id.*

L'orage atteint Strasbourg à 17 heures 45. 37 bulletins d'orages parviennent le lendemain à l'Institut. Cet orage a été enregistré à Strasbourg à l'aide de l'oscillographe à fer mobile d'Abraham, pendant sept minutes et demie, *il a donné des décharges très violentes sur*

la totalité du cadre. D'autres orages, au contraire, comme celui du 13 septembre n'ont fourni des parasites nombreux que sur les sections à faible longueur d'onde. **Il y a là un fait dont l'étude devra être poursuivie.** Toutefois la direction dans laquelle on trouve le maximum ne dépend pas des sections utilisées.

Ces nouvelles séries d'observations montrent encore que l'étude des parasites atmosphériques peut apporter une contribution à la prévision du temps.

IV

Conclusion

La prévision du temps à l'aide des cartes isobariques exige de très nombreuses observations au sol, une organisation internationale officielle de transmissions, une conception raisonnée de la distribution future des isobares. Les recherches expérimentales que je viens d'exposer montrent que l'on peut utiliser avec profit les données des sondages aérologiques et les parasites atmosphériques. Il me paraît que leurs indications, dans les divers observatoires, peuvent considérablement améliorer les pronostics et rendre de réels services à l'agriculture et à la navigation maritime et aérienne.

Si l'on développait les deux méthodes dont je viens de parler, la météorologie changerait d'aspect et cesserait d'être la science de la pression et de la température au sol, elle deviendrait plus encore *la science de l'atmosphère.*

C'est pour tendre vers ce but que j'ai utilisé d'abord les quelques loisirs que me laissait la vie militaire et je tiens à remercier ici, M. Rothé, Directeur de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Strasbourg de m'avoir ensuite fourni gracieusement les moyens de mettre à profit mes vacances scolaires pour multiplier les observations que je viens d'exposer. Puissent-elles rendre le moindre service à la Météorologie.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE PREMIER. — **Les ballons-sondes** 5
§ I. — Les visées des ballons-sondes 7
§ II. — Teisserenc de Bort et l'étude de la haute atmosphère 9

CHAPITRE II. — **De l'avion météorologique** 11

CHAPITRE III. — **Les ballons-pilotes** 15
§ I. — Le sondage par ballon-pilote 16
§ II. — Vitesse ascensionnelle des ballons-pilotes 17
§ III. — Courants verticaux, vagues et tourbillons 24

CHAPITRE IV. — **Agitation tourbillonnaire** 32

CHAPITRE. V. — **Les ballons pilotes et la prévision des temps** 45

CHAPITRE VI. — **Observations personnelles sur les sondages par ballons-pilotes** 50
§ I. — Sondages sur plateau anticyclonique 55
§ II. — — sur la périphérie d'un plateau 55
§ III. — L'approche des basses pressions est signalée. 56
§ III. bis. — Annonce de basses pressions par vents anticycloniques des régions W. 57
§ IV. — La dépression n'est pas à redouter 58
§ IV. bis. — — est à craindre 59
§ V. — Menaces d'orages et de grains 60
§ VI. — Régime dépressionnaire 68
§ VII. — Dépressions méditerranéennes 69
§ VIII. — Eloignement d'une dépression 70
§ IX. — Dépressions secondaires 71
§ X. — Conclusions pouvant servir à la prévision 73

CHAPITRE VII. — **Les parasites atmosphériques** 77
§ I. — Observations 1918 81
§ II. — Observations 1921 82
§ III. — Observations 1922 89
§ IV. — Conclusion 91

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ

L'HÉLIUM DANS LA NATURE

VU ET APPROUVÉ :
Strasbourg, le 27 décembre 1922.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Signé : P. MULLER.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :
Strasbourg, le 30 décembre 1922.
Le Recteur,
Signé : S. CHARLÉTY.

Imprimerie G. PAUC, 6, rue d'Aiguepasses. — Mende